



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA**

**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS**

**Estudio del proceso de deshidratación de alimentos frutihortícolas: empleo de  
microondas y energía solar**

**Ing. Carolina Medina Jaramillo**

**Trabajo de Tesis presentado para optar al grado académico de**

**Magister en Tecnología e Higiene de los Alimentos**

**Directora: Dra. Laura Analía Campañone**

**Co-Directora: Dra. Estela Bruno**

**Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos (CIDCA)**

**La Plata, Buenos Aires**

*Dedicada a*

*mi gran compañero de viaje Alex Fernando López  
y a nuestra querida hija Camila, fruto del gran amor.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a la Doctora Laura Campañone y Estela Bruno por el acompañamiento, dirección y paciencia durante el desarrollo de este trabajo; de igual forma a la Doctora Anabel Rodríguez, por su gran compañía en el laboratorio y sus grandes aportes para este desarrollo.

A mi tía Gloria Jaramillo por su confianza en mí y a mis padres por su gran apoyo a pesar de la distancia.

A mi gran compañera Sara Restrepo, por su compañía y largas horas de estudio.

Un gran agradecimiento a mi amado Alex, por sus insistentes consejos, por su apoyo incondicional y su eterna paciencia.

Al CIDCA por permitirme desarrollar todo el trabajo experimental.

# ÍNDICE

ÍNDICE .....	4
ÍNDICE DE FIGURAS .....	6
ÍNDICE DE TABLAS .....	8
RESUMEN .....	9
1. INTRODUCCIÓN .....	11
2. OBJETIVOS .....	14
2.1. OBJETIVOS GENERALES .....	14
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
3. ESTADO DEL ARTE .....	15
3.1. FRUTAS Y HORTALIZAS .....	15
3.1.1. FRAMBUESA .....	16
3.1.2. KIWI .....	17
3.1.3. TOMATE .....	19
3.1.4. ACELGA .....	20
3.2. DESHIDRATACIÓN .....	22
3.2.1. ETAPAS DEL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN .....	23
3.2.2. MÉTODOS DE DESHIDRATACIÓN .....	26
3.3. DESHIDRATACIÓN SOLAR .....	27
3.4. DESHIDRATACIÓN POR MICROONDAS .....	33
3.5. MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE MATERIA .....	39
4. MATERIALES Y MÉTODOS .....	42
4.1. MATERIALES .....	42
4.2. PROCESOS DE DESHIDRATACIÓN .....	42
4.2.1. DESHIDRATACIÓN SOLAR .....	42
4.2.2. DESHIDRATACIÓN POR MICROONDAS .....	45

5.	CARACTERIZACIÓN .....	47
5.1.	DETERMINACIÓN DE HUMEDAD.....	47
5.2.	DETERMINACIÓN DE LA ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE.....	47
5.3.	DETERMINACIÓN DEL COLOR.....	48
5.4.	DETERMINACIÓN DE TEXTURA.....	49
5.5.	ANÁLISIS DE LA MICROESTRUCTURA.....	51
6.	RESULTADOS Y DISCUSIONES .....	52
6.1.	SECADO SOLAR.....	52
6.1.1.	HISTORIAS TÉRMICAS.....	52
6.1.2.	PÉRDIDA DE PESO .....	54
6.1.3.	TEXTURA.....	60
6.1.4.	ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE.....	62
6.2.	SECADO POR MICROONDAS.....	63
6.2.1.	HISTORIAS TÉRMICAS.....	63
6.2.2.	PÉRDIDA DE PESO .....	67
6.2.3.	COLOR.....	68
6.2.4.	TEXTURA.....	70
6.2.5.	ANTIOXIDANTES .....	71
6.2.6.	MICROESTRUCTURA .....	72
7.	OBSERVACIONES.....	75
7.1.	IMÁGENES DE LOS PRODUCTOS (OBSERVACIONES VISUALES) .....	75
8.	CONCLUSIONES .....	79
9.	BIBLIOGRAFÍA .....	81

# ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. ETAPAS DEL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN.....	23
FIGURA 2. RADIACIÓN INCIDENTE EN UN OBJETO. ....	30
FIGURA 3. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.....	35
FIGURA 4. ESQUEMA DE UN HORNO MICROONDAS. ....	39
FIGURA 5. EQUIPO DE SECADO SOLAR. ....	43
FIGURA 6. HORNO MICROONDAS. ....	45
FIGURA 7. CARTA DE COLOR. ....	49
FIGURA 8. PERFILES DE TEXTURA-ENSAYO DE COMPRESIÓN.....	51
FIGURA 9. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DURANTE EL PROCESO DE SECADO SOLAR .....	52
FIGURA 10. PÉRDIDA DE PESO, SECADO SOLAR. ....	55
FIGURA 11. PÉRDIDA DE PESO PARA CADA PRODUCTO .....	57
FIGURA 12. PARÁMETROS DE COLOR PARA LA FRAMBUESA (SECADO SOLAR).....	58
FIGURA 13. PARÁMETROS DE COLOR PARA EL KIWI (SECADO SOLAR). ....	58
FIGURA 14. PARÁMETROS DE COLOR PARA EL TOMATE (SECADO SOLAR). ....	59
FIGURA 15. PARÁMETRO DE COLOR PARA LA ACELGA (SECADO SOLAR). ....	59
FIGURA 16. DUREZA (N) DE LOS ALIMENTOS DESHIDRATADOS POR SECADO SOLAR. A) FRAMBUESA, KIWI, ACELGA. B) TOMATE.. .	61
FIGURA 17. CAPACIDAD ANTIOXIDANTE DE LOS PRODUCTOS FRESCOS Y DESHIDRATADOS EN HORNO SOLAR (1/EC50 EN G DE TEJIDO DEL PRODUCTO). ....	62
FIGURA 18. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DURANTE EL PROCESO DE SECADO POR MICROONDAS. ....	64
FIGURA 19. PÉRDIDA DE PESO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO, SECADO POR MICROONDAS. ....	67
FIGURA 20. PARÁMETROS DE COLOR PARA EL KIWI (SECADO POR MICROONDAS). ....	68
FIGURA 21. PARÁMETROS DE COLOR PARA EL TOMATE (SECADO POR MICROONDAS). ....	69
FIGURA 22. PARÁMETROS DE COLOR PARA LA ACELGA (SECADO POR MICROONDAS).....	69
FIGURA 23. DUREZA (N) DE LOS ALIMENTOS SECADOS POR MICROONDAS. A) KIWI, ACELGA. B) TOMATE. ....	70

FIGURA 24. CAPACIDAD ANTIOXIDANTE EN PRODUCTOS SECADOS POR MICROONDAS (1/EC50 EN G DE TEJIDO DEL PRODUCTO). .	72
FIGURA 25. MICROESTRUCTURA DEL KIWI. A) FRESCO, B) SECADO SOLAR, C) SECADO POR MICROONDAS. ....	73
FIGURA 26. MICROESTRUCTURA DEL TOMATE A) FRESCO, B) SECADO SOLAR, C) SECADO POR MICROONDAS. ....	74
FIGURA 27. MICROESTRUCTURA DE ACELGA A) FRESCA, B) SECADO SOLAR, C) SECADO POR MICROONDAS. ....	74
FIGURA 28. FOTOGRAFÍAS DE FRAMBUESAS. ....	75
FIGURA 29. FOTOGRAFÍAS DEL KIWI. ....	76
FIGURA 30. FOTOGRAFÍAS DE TOMATES. ....	76
FIGURA 31. FOTOGRAFÍAS DE ACELGAS. ....	77

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. TEMPERATURA Y HUMEDAD MEDIA DE LOS PRODUCTOS DURANTE EL SECADO SOLAR. ....	53
TABLA 2. DUREZA (N) DE LOS PRODUCTOS FRESCOS Y SECOS. ....	60
TABLA 3. CAPACIDAD ANTIOXIDANTE (1/EC50). ....	63
TABLA 4. TEMPERATURA Y HUMEDAD MEDIA DE LOS PRODUCTOS EN SECADO POR MICROONDAS. ....	65
TABLA 5. PROPIEDADES DIELECTRICAS DE PRODUCTOS FRUTIHORTÍCOLAS. ....	66
TABLA 6. CAPACIDAD ANTIOXIDANTE (1/EC50). ....	71
TABLA 7. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS PRODUCTOS POR SECADO SOLAR Y MICROONDAS. ....	78



## RESUMEN

En este trabajo se estudió el efecto de la deshidratación solar y por microondas sobre las características microestructurales, fisicoquímicas y sensoriales de productos frutihortícolas, tales como acelga (*Beta vulgaris var. cicla*), tomate (*Lycopersicum esculentum*), kiwi (*Actinidia chinensis*) y frambuesa (*Rubus idaeus*). Los frutos fueron adquiridos en el mercado local, se acondicionaron y se trataron de la siguiente manera: para el secado solar se empleó un equipo prototipo donde el alimento alcanzó una temperatura máxima de 61°C y un tiempo de secado máximo de 14 horas para los frutos mas húmedos y de 5 horas para los de menor humedad. En cuanto a la deshidratación por microondas, los productos se sometieron a una potencia de 119 W (17 % de la potencia total) durante 5 horas para los frutos más húmedos y 35 minutos para los de menor humedad inicial; finalmente todos los productos alcanzaron un valor de humedad mínima segura determinada por el Código Alimentario Argentino (CAA). Además se realizaron determinaciones de la capacidad antioxidante, color, textura; para las muestras frescas y secas sometidas por ambos métodos. Teniendo como resultado final productos deshidratados con buenas propiedades organolépticas, pudiendo ser utilizados en cualquier época del año y como materia prima para elaboración de diferentes productos. Los métodos utilizados alcanzaron las expectativas (obtención de productos de calidad) con un mayor tiempo de procesamiento para el secado solar. Sin otra razón los métodos de secado estudiados son viables para secado industrial de alimentos frutihortícolas específicamente en los estudiados en el presente trabajo.

**Palabras claves:** Productos frutihortícolas, Deshidratación solar, Microondas, Caracterización.

## **1. INTRODUCCIÓN**

La ingesta insuficiente de frutas y verduras constituye una de las principales causas de enfermedades crónicas. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) el bajo consumo de estos alimentos es uno de los 10 factores principales de riesgo de mortalidad a nivel mundial (OMS, 2013). Actualmente la OMS recomienda un consumo de frutas y hortalizas de 400 g/día. Sin embargo, la ingesta de estos productos se encuentra entre el 20% y el 50% del valor recomendado. En este sentido, se requiere aumentar el consumo de frutas y verduras para prevenir el riesgo de aparición de enfermedades (OMS, 2013).

En Argentina la producción total agrícola es de 3.209 millones de toneladas, de las cuales un 22% es producción de frutas y hortalizas generando recursos por un valor de 3000 millones de dólares y exportaciones por más de 1000 millones (SAGPYA, 2013). Las frutas y hortalizas frescas son productos muy perecederos y, por tal motivo, ocurren importantes pérdidas, daños y deterioros de calidad durante los procesos de comercialización desde la cosecha hasta el consumidor final (Kader, 1992).

Dichas pérdidas son ocasionadas desde el transporte hasta el manejo en las tiendas donde se comercializan, contando el mal almacenamiento y el trato del producto, dando como resultado importantes pérdidas económicas para el comerciante. Por tal motivo las técnicas de conservación estudiadas resultan no sólo un método para la conservación y alargamiento de la vida útil de los productos, sino también llevan a una disminución en las pérdidas económicas y contribuyen a mejorar la calidad organoléptica de los productos ofrecidos al consumidor.

La deshidratación sigue siendo una de las operaciones unitarias más importantes en la conservación de alimentos (Vega-Mercado y col, 2001). Los métodos de deshidratación tienen importantes ventajas tales como: i) bajo costo de procesamiento, ii) facilitan el transporte y el almacenamiento de los productos, iii) mejoran la disponibilidad de alimentos perecederos y iv) aumentan la estabilidad fisicoquímica y microbiológica (Okos y col, 1992). Además, los productos secos tienen un precio constante a lo largo de todo el año y se pueden incorporar en *snacks* y productos procesados (Perumal, 2007).

Debido a la escasez mundial de energía y al control de los impactos ambientales nocivos, la búsqueda de métodos de deshidratación eficaces, económicos y amigables con el medio ambiente constituye un desafío importante. En este contexto, el secado solar y por microondas tienen importantes ventajas.

Generalmente los secadores solares son equipos de pequeña capacidad. El diseño de los mismos está basado en datos empíricos y semi-empíricos preferentemente, más que en diseños teóricos. La mayoría de los diseños de secadores solares, que están disponibles, se utilizan principalmente para el secado de diversos cultivos, ya sea para uso familiar o para la producción industrial a pequeña escala (Belessiotis y Delyannis, 2011). La deshidratación por microondas es aplicada como único proceso o combinado con otros métodos de secado tales como secado convectivo por aire caliente, deshidratación osmótica y otros procesos (Arballo, 2010). Esta técnica ha adquirido un mayor interés ya que emplea como forma de calentamiento la generación de energía térmica directamente en el interior del alimento, lo que permite disminuir los tiempos de deshidratación y por

consiguiente puede tener consecuencias directas en términos de eficiencia energética y calidad de los alimentos (Pardo y Zufía, 2012).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivos generales**

- Estudiar los fenómenos de transferencia de energía y materia, determinando la influencia de las condiciones de proceso sobre la variación de temperatura y de peso del producto durante la deshidratación solar y empleando microondas.
- Determinar la influencia del tipo de proceso sobre la variación de índices de calidad del producto estudiado.
- Vincular las historias térmicas y las cinéticas de variación de índices de calidad de forma que se puedan optimizar los procesos con productos de una mejor calidad final compatible con las condiciones de operación y costos tecnológicamente accesibles.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Emplear un horno solar prototipo y horno comercial de microondas para deshidratar frutas y hortalizas, en particular frambuesas, kiwis, tomates y acelgas.
- Estudiar las cinéticas de pérdida de peso y el aumento de temperatura de los productos sometidos a los distintos procesos de deshidratación.
- Evaluar la calidad de los productos obtenidos en cada proceso por medio de los parámetros de color, textura, micro estructura y contenido de antioxidantes.
- Seleccionar una técnica conveniente de acuerdo a la calidad final del producto obtenido en cada técnica de procesamiento.

### **3. ESTADO DEL ARTE**

#### **3.1. Frutas y hortalizas**

Según el Código Alimentario Argentino (CAA) en su Capítulo XI, Artículo 819 se define como hortaliza a toda planta herbácea producida en la huerta, de la que una o más partes pueden utilizarse como alimento. El Artículo 820 – define como “hortaliza fresca la de cosecha reciente y consumo inmediato en las condiciones habituales de expendio” y el Artículo 821 define como “hortaliza desecada o deshidratada la que ha sido privada de la mayor proporción del agua de constitución”. En el Artículo 887 del mismo capítulo, se define por “fruta destinada al consumo al fruto maduro procedente de la fructificación de una planta sana”.

En base a la normativa denominaremos fruta desecada a la que ha sido sometida a desecación en condiciones ambientales naturales para privarlas de la mayor parte del agua que contienen; fruta deshidratada a la que se ha sometido principalmente a la acción del calor artificial por empleo de distintos procesos controlados, para privarlas de la mayor parte del agua que contienen.

Un informe publicado por la OMS y la FAO recomienda como objetivo poblacional la ingesta de frutas y verduras para prevenir enfermedades crónicas y mitigar varias carencias de micronutrientes, sobre todo en los países menos desarrollados (OMS, 2013).

Una dieta rica en frutas y verduras ofrece protección contra algunas enfermedades comunes, tales como eventos cardiovasculares, cáncer y otras enfermedades degenerativas relacionadas con la edad. Se conocen los efectos beneficiosos de las frutas

para la salud, muchas de ellas debido en particular a su contenido de antioxidantes (Scalzo y col, 2005).

En este trabajo, se analizarán los siguientes productos frutihortícolas:

### **3.1.1. Frambuesa**



La frambuesa (*Rubus idaeus* L. subsp. *idaeus*) es uno de los frutos más populares en el mundo, que se consumen como frutas frescas y procesadas para mermeladas, confituras y otros productos o como ingredientes de diversos alimentos. La frambuesa es un fruto formado por diferentes drupas o granos rugosos y redondeados que, agrupados, forman una pequeña piña con aspecto circular o cónico. Cada una de las drupas dispone de un pequeño pelo dorado. Su piel contiene un fino vello, aterciopelado, apenas perceptible a simple vista y en su interior dispone de pequeñas semillas que pasan casi desapercibidas durante su degustación en fresco. Los beneficios más importantes para la salud se atribuyen a los compuestos fenólicos, como los flavonoides, ácidos fenólicos y taninos y por lo que a menudo son considerados como productos funcionales naturales (Bobinaitė y col, 2012). La frambuesa en nuestro país tiene su destino principalmente en la industria de los dulces, a nivel interno y en el mercado de los congelados para el mercado externo.



La producción requiere de condiciones particulares de clima, suelo y ambiente. Es por eso que las áreas productivas se extienden en una gran superficie geográfica pero son pequeñas y muy localizadas. La principal zona donde se produce es la Patagonia, siendo la Comarca Andina, integrada por las localidades de El Bolsón, El Hoyo, Epuyén y Lago Puelo, la principal región. También se desarrollan plantaciones en el Valle Inferior del Río Chubut, el Alto Valle del Río Negro y Neuquén. Otro de los sitios donde se ha podido desarrollar estas plantaciones es una pequeña área del norte de la provincia de Buenos Aires, en las localidades de Arrecifes, Baradero, Zárate y Lima. Otras zonas productivas están situadas en la ciudad de Concordia y en la provincia de Tucumán. (<http://www.cfired.org.ar/Default.aspx?nId=848>, 2013).

Nutricionalmente cuenta con un 77.63% de agua; 1.09% de proteína; 5.88% de fibra dietética total; 10.81% de carbohidratos; 0.59% de lípidos totales y 4% de azúcares totales; y 52 Kcal por cada 100 g de producto comestible (USDA, 2013).

### **3.1.2. Kiwi**



El kiwi (*Actinidia chinensis*) es una planta originaria de China, donde crece espontáneamente. Es una baya de forma ovoidea, de piel parda con vellosidades en su totalidad y con una pulpa verde color esmeralda que contiene numerosas semillas muy pequeñas. Es una fruta altamente nutritiva debido a su alto nivel de vitamina C y su fuerte capacidad antioxidante debido a una gran cantidad de fitonutrientes como los carotenoides, luteína, fenólicos, flavonoides y clorofila (Kaya y col, 2008).

Según la Asociación Argentina del Kiwi y Agroconsultora Plus, actualmente Argentina produce 3.000 toneladas y consume 8.000, lo que implica la importación de frutas de Chile, Italia y Nueva Zelanda. La demanda internacional para nuestro país proviene de Europa, Asia y América del Norte. Actualmente se cultiva con buen rendimiento en zonas de Mar del Plata, La Plata, Baradero y San Pedro (<http://www.agroconsultoraplus.com/noticiaskiwi.htm>, 2013).

Su composición consta de un 74.6% de agua; 1% de proteína; 2.7% de fibra dietética total; 13.2% de carbohidratos; 0.5% de lípidos totales y 8.1% de azúcares totales; y 61 Kcal por cada 100 g de producto comestible (USDA, 2013).

### 3.1.3. Tomate



El tomate pertenece a la familia de las Solanáceas (Cantwell y Kasmire, 2007). El centro del origen de la especie *Solanum lycopersicum* es la región andina (Rick, 1990). Es una baya con el epicarpio muy blando y el mesocarpio y endocarpio muy carnosos y jugosos, es polispermo y el exocarpio es delgado. En la actualidad, los principales países productores son China, Estados Unidos, India, Turquía y Egipto (FAOSTAT, 2011). La producción mundial se ubica en los 153 millones de toneladas. Es una de las hortalizas más consumidas en el mundo, ya sea como fruta fresca o como producto procesado. De hecho, en Europa y en los EE.UU., los tomates están en segundo lugar de consumo y se utilizan en la industria alimentaria como materia prima para la producción de varios productos como jugos, salsas, purés, pastas y tomates enlatados. En las últimas décadas, el consumo de tomates se ha asociado con la prevención de varias enfermedades, principalmente debido al contenido de antioxidantes, incluyendo carotenos (licopeno, así como  $\beta$ -caroteno), ácido ascórbico, tocoferol, y compuestos fenólicos. Considerando que el tocoferol y ácido ascórbico se conocen como vitaminas antioxidantes y compuestos termolábiles, el licopeno y los compuestos fenólicos son más resistentes al tratamiento térmico, siendo los principales antioxidantes en productos procesados (Navarro-González y col, 2011). Es un alimento funcional teniendo en cuenta la evidencia epidemiológica en la reducción del

riesgo de ciertos tipos de cánceres. El licopeno, el más importante de los antioxidantes, se encuentra en mayor proporción y se ha demostrado que induce la comunicación de célula a célula y modula el sistema inmunológico, las hormonas y otras vías metabólicas. El consumo de tomate y productos derivados del tomate está siendo considerado como un indicador nutricional de los buenos hábitos alimentarios y estilos de vida saludables (Valdez-Morales y col, 2014).

Con respecto a su composición, consta de un 91.3% de agua; 0.85% de proteína; 1.16% de fibra dietética total; 3.75% de carbohidratos; 0.2% de lípidos totales y 2.54% de azúcares totales; y 18 Kcal por cada 100 g de producto comestible (USDA, 2013).

#### **3.1.4. Acelga**



La acelga (*Beta vulgaris* subespecie *Cycla*) es una planta herbácea bienal y de hojas comestibles. Las hojas son muy grandes, con un pecíolo y nerviación central muy desarrollados; los limbos de las hojas son grandes y redondeados y en ocasiones recubren ligeramente los pecíolos hasta su base; el color de las hojas es variable, desde colores amarillos hasta verdes oscuros. Se ha cultivado en Europa desde la antigüedad y ahora es ampliamente cultivada en las regiones templadas, incluidas las partes del norte de la India

y América del Sur (Pyo y col, 2004). Dentro del grupo de hortalizas de hojas verdes, la acelga representa el 23% en la producción Argentina. En las provincias de La Pampa y Santa Cruz, territorios definidos como áridos y semiáridos, existen algunos polos de producción hortícola, aunque son de baja producción y se utilizan para el abastecimiento local. En La Pampa encontramos una superficie cultivada total de aproximadamente 60 hectáreas a campo y 33.200 m<sup>2</sup> bajo cubierta de productos hortícolas (INTA, 2012). De estos totales, el 55 % bajo cubierta se lo utiliza para la producción de lechuga (35%), acelga (18%) y espinaca (2%).

El crecimiento de la demanda potencial impulsó el desarrollo de la horticultura, aunque el mismo todavía es insuficiente para abastecer la totalidad del consumo local. Las zonas cordilleranas y precordilleranas cuentan con microclimas favorables, siendo una de las regiones más importantes la de “Los Antiguos”. Esta localidad, ubicada en el margen sur del lago Argentino y a orillas del río Los Antiguos, tiene una importante producción frutihortícola. De las 1.300 hectáreas que posee el valle, unas 700 están ocupadas por chacras con cultivos de frutas, verduras y hortalizas ([http://www.cofecyt.mincyt.gov.ar/pdf/productos\\_alimenticios/Frutihorticola/Hortalizas.pdf](http://www.cofecyt.mincyt.gov.ar/pdf/productos_alimenticios/Frutihorticola/Hortalizas.pdf), 2013).

Su poder antioxidante es principalmente debido a los flavonoides como el ácido sirínico y el ácido kaempferol (Pyo y col, 2004). Con respecto a su composición, consta de un 91.65% de agua; 1.78% de proteína; 1.58% de fibra dietética total; 3.7% de carbohidratos; 0.20% de lípidos totales y 1% de azúcares totales; y 19 Kcal por cada 100 g de producto comestible (USDA, 2013).

### **3.2. Deshidratación**

Uno de los métodos de conservación usados para aumentar la vida útil de los productos es el proceso de deshidratación, que trae consigo factores a tener en cuenta como el diseño del equipo, el tipo de alimento a deshidratar, la cantidad de producción y el tipo de deshidratación. Este proceso permite una sustancial reducción de masa y volumen, cuyos requerimientos de envasado, almacenamiento y costos de transporte son más convenientes.

Es una operación unitaria mediante la cual se elimina total o parcialmente el agua de la sustancia que la contiene. Considerando que el secado es un proceso de transferencia simultánea de materia (agua) y de energía (calor), se cuenta con una transmisión de calor que proporcione el calor latente de vaporización necesario para eliminar el agua y un transporte de agua desde el alimento hacia el exterior; ambos procesos se realizan simultáneamente, influyendo uno sobre el otro. La velocidad a la que se produce el secado, así como el tiempo necesario para ello, dependerán de estas transferencias acopladas (Treybal, 1980).

El secado se aplica a sólidos, líquidos o gases. Como la mayoría de los productos agroalimentarios son sólidos, se define mejor la deshidratación como la operación básica por la que el agua contenida en el sólido o una disolución se transfiere a la fase fluida que lo rodea debido a los gradientes de actividad de agua ( $a_w$ ) entre ambas fases. En la operación ocurre el transporte simultáneo de calor y masa; el calor sensible y el calor de evaporación, mientras el agua o vapor de agua se transporta por el interior del alimento

hasta la superficie de evaporación donde el vapor de agua se transfiere desde el alimento hacia la atmósfera circundante (Maupoey y col, 2001).

Este proceso se emplea como método de preservación, inhibiendo la velocidad de crecimiento de microorganismos y las reacciones de degradación de calidad.

### 3.2.1. Etapas del proceso de deshidratación

Existen varias etapas en el proceso de deshidratación como se muestra en la Fig. 1.

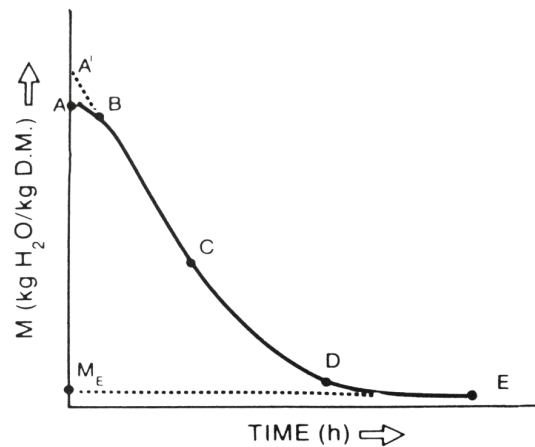


FIGURA 1. ETAPAS DEL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN

- Primera etapa (A-B):

Representa un período de calentamiento del producto sólido y la superficie del mismo llega al equilibrio con el aire de secado. Es una porción insignificante del ciclo completo de deshidratación (Farid, 2010).

- Segunda etapa (B-C):

Es un período de deshidratación durante el cual el agua removida por unidad de superficie es constante. En este período, el movimiento de humedad a través del sólido es rápido para llegar a una condición de saturación de la superficie y la velocidad de secado es controlada por la velocidad de transferencia de energía. Durante este período, la superficie del sólido se encuentra saturada de agua líquida debido a que el movimiento de agua a través del sólido tiene lugar a una velocidad mayor que la velocidad de evaporación desde la superficie. Este período es altamente afectado por los coeficientes de transferencia de calor y/o humedad, el área expuesta al medio de deshidratación y la diferencia de temperatura y humedad relativa entre el aire de secado y la superficie húmeda del sólido.

En esta etapa, el equilibrio entre la transferencia de calor y la transferencia de vapor de agua puede expresarse por la siguiente relación:

$$\frac{dW}{dt} \cong \frac{dQ}{dt\lambda} \quad \text{Ec.1}$$

donde W es la cantidad de vapor de agua en la muestra, Q es energía,  $\lambda$  es calor latente de vaporización y t es el tiempo.

La transferencia de calor global puede ser expresada a través de la siguiente ecuación:

$$\frac{dQ}{dt} = h_c A (\Delta T) \quad \text{Ec.2}$$

siendo  $h_c$  el coeficiente de transferencia de calor y  $\Delta T$  es la diferencia de temperaturas entre la superficie del producto y el medio y A es el área expuesta al medio ambiente.

La transferencia de vapor de agua puede ser calculada a través de la siguiente ecuación:



$$\frac{dW}{dt} = k_g A (\Delta P_w) \quad \text{Ec.3}$$

donde  $k_g$  es el coeficiente de transferencia de materia y  $\Delta P_w$  es la diferencia de presiones parciales de vapor de agua entre la superficie del producto y el medio (Cheftel y col., 1992).

- Tercera etapa (C-D):

La transferencia de agua a través del alimento se retarda hacia el final del secado, debido al aumento del espesor de la capa seca y la permeabilidad del vapor a través de esta capa seca disminuye a medida que desciende el contenido de agua. Además, el contenido de agua libre en el interior del producto se agota y deja de migrar hacia la superficie, la presión parcial de vapor en la superficie disminuye progresivamente y, en consecuencia, la velocidad de secado desciende. El fenómeno que limita la velocidad de secado es la transferencia interna de agua o vapor a la superficie. Sólo un aumento de la temperatura del producto puede suministrar el calor de desorción y acelerar la velocidad en esta etapa.

- Cuarta etapa (D-E):

El punto E es el punto en el cual toda la superficie expuesta se vuelve completamente no saturada y marca el tiempo para el cual la velocidad de movimiento de humedad interna controla completamente la velocidad del proceso de secado.

Conforme a las leyes de la termodinámica, la actividad de agua del producto al final del proceso, será igual a la humedad relativa del aire del ambiente de secado, por eso es conveniente bajar la humedad del aire al finalizar el proceso de deshidratación.

Usualmente, los períodos de descenso de la velocidad representan la mayor proporción del proceso de deshidratación.

La velocidad de secado de cada una de las fases depende, en gran parte, de las características propias del alimento: contenido inicial de agua, componentes (proteínas, almidón, polímeros y azúcares amorfos, los cuales aumentan la proporción de agua ligada y prolongan el tiempo de secado), la superficie del alimento, estructura del tejido, entre otros (Cheftel y col., 1992).

En resumen, la deshidratación de alimentos conlleva las siguientes ventajas: bajo costo de procesamiento, facilidad de transporte y almacenamiento, aumento del valor agregado a los productos, disponibilidad de los mismos fuera de la temporada de cosecha, sin necesidad de refrigerar, congelar o adicionar conservantes, evitando el crecimiento microbiano y retardando las reacciones químicas de deterioro.

### **3.2.2. Métodos de deshidratación**

Existen diferentes métodos de deshidratación usados en la industria de los alimentos. Cabe mencionar algunos de ellos, como forma de comparación con los métodos estudiados en el presente trabajo:

- Secado convectivo con aire caliente: consiste en la remoción del agua mediante la aplicación de un flujo de aire a cierta temperatura y velocidad; usado principalmente para productos sólidos como frutas y hortalizas.

- Secado al vacío: tiene como fundamento el aprovechamiento del descenso del punto de ebullición del agua con el descenso de la presión, que es la temperatura a la cual la presión de vapor iguala la presión de la atmósfera que la rodea. Se usa para frutos o alimentos termosensibles.
- Ósmosis: esta técnica se basa en la pérdida de agua desde el alimento hacia una solución hipertónica debida a un gradiente de potenciales químicos, un flujo de soluto desde la solución hacia el alimento y una lixiviación de solutos propios del alimento como azúcares, ácidos orgánicos, vitaminas y minerales.
- Liofilización: la deshidratación de los productos ocurre por sublimación en productos congelados. Se usa con frecuencia para alimentos líquidos y sólidos de alto valor agregado (frambuesas, frutillas, etc).

En nuestro estudio, los métodos abordados son la deshidratación solar y el uso de microondas.

### **3.3. Deshidratación solar**

En la actualidad, la conversión de la energía solar se utiliza ampliamente para generar calor y producir electricidad. Un estudio comparativo sobre el consumo mundial de energía lanzado por la Agencia Internacional de Energía (AIE) muestra que en el año 2050, las instalaciones de paneles solares suministrarán alrededor del 45% de la demanda de energía en el mundo. Debido a la escasez mundial de energía y al control de los impactos ambientales nocivos, la aplicación de la energía solar ha de recibir mucha atención en las

ciencias de la ingeniería. Por lo tanto, se intensifica la búsqueda de métodos eficaces y económicos para capturar, almacenar y convertir la energía solar en energía útil (Mekhilef y col, 2011).

En el país hay desarrollos de secaderos solares por parte del Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO) ubicado en la provincia de Salta, donde se realizaron trabajos de secado por túnel en laboratorio y en secaderos solares. Los resultados obtenidos muestran en forma comparativa, que uno y otro proceso difieren en la rapidez, pero disminuye notoriamente los costos de producción. Por otro lado en la Provincia del Chaco en la Facultad Regional de Resistencia, Universidad Tecnológica Nacional, junto con el INCUPO (Instituto de Cultura Popular) y el INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) se diseñó, construyó y ensayó un secador solar de bajo costo, adaptado a la zona, compuesto por un colector solar plano y una cámara de secado con capacidad para, aproximadamente, 5 kg de producto fresco; esto se hizo con el fin de transferir la tecnología a comunidades rurales de bajos recursos y pequeños productores frutihortícolas ([santafe.com.ar/data/arch\\_cont/archivos/36.pdf](http://santafe.com.ar/data/arch_cont/archivos/36.pdf), 2013).

La energía que nos llega a diario del sol puede ser aprovechada para generar calor (conversión fototérmica) o electricidad (conversión fotovoltaica). Desde 1974 el Grupo de Energía Solar de la Comisión Nacional de la Energía Atómica (CNEA) viene trabajando en diferentes desarrollos, formación de recursos humanos y difusión sobre la energía solar.

En esta técnica la fuente de energía es el sol, una esfera de materia gaseosa intensamente caliente. La energía es generada en el centro del sol a partir de la combinación de 4 átomos de hidrógeno para formar helio. La masa sobrante se transforma en energía y se

traslada a la superficie y luego es irradiada al espacio en todas las direcciones. El sol no trabaja como cuerpo negro ya que la radiación solar emitida es el resultado de la composición del funcionamiento de varias capas, las cuales emiten y absorben radiación de varias longitudes de onda (Alustiza, 2002).

La emisión total generada es de  $3.8 \times 10^{23}$  KW, y de esta cantidad, la Tierra intercepta solamente  $1.7 \times 10^{14}$  KW (Alustiza, 2002).

Del total de la energía recibida de la radiación solar, el 30% se refleja sin cambio de longitud de onda, el 47% es absorbido por la atmósfera y la superficie terrestre provocando un aumento en la temperatura y se irradia hacia el espacio, y únicamente el 23% restante penetra en el sistema terrestre para almacenarse en océanos y ríos.

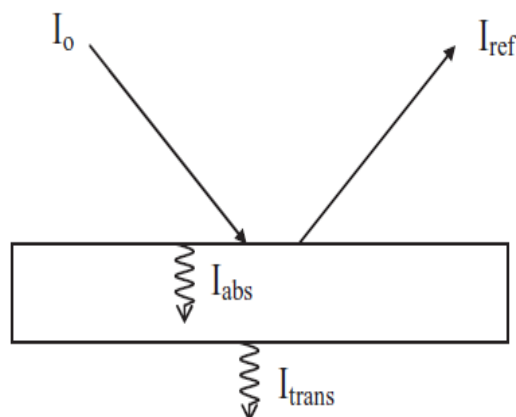
Una pequeña proporción de la energía almacenada como energía química en las plantas y tejidos animales se ha acumulado a lo largo de millones de años bajo condiciones geológicas favorables en forma de carbón y aceites minerales, convirtiéndose en nuestras reservas de combustibles fósiles. El ritmo de formación es mínimo en comparación con el ritmo de consumo. Por esta razón para reducir el ritmo de agotamiento de estas fuentes de energía, se podría aprovechar la energía solar, derivando el flujo de estas importantes cantidades radiantes y redirigirlas a nuestro favor, antes que se disipen y sean irradiadas al espacio (Alustiza, 2002).

La energía ( $E$ ) de la radiación es directamente proporcional a su frecuencia ( $\nu$ ) (Duffie, 1980; Ozisik, 1973):

$$E = h\nu$$

Ec. 4

donde  $h$  es la constante de Plank ( $6.6256 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ) y  $\nu$  es la frecuencia de la radiación ( $\text{s}^{-1}$ ).



**FIGURA 2. RADIACIÓN INCIDENTE EN UN OBJETO.**

Cuando incide la energía radiante (energía solar) sobre una superficie, ésta absorbe una parte de esa energía (Fig. 2). Pero cuando esa superficie actúa como un cuerpo negro, se absorbe la mayor parte de la energía incidente (Duffie, 1980). Este es un proceso complejo que varía según el tipo de material e implica difusión, absorción de fotones, aceleración de electrones, múltiples colisiones, pero finalmente, la energía radiante se transforma en calor, con lo que se excitan las moléculas superficiales y se incrementa la temperatura (Alustiza, 2002). En el proceso de calentamiento a una longitud de onda infrarroja, la energía térmica es absorbida primero por la superficie del alimento aumentando así la temperatura superficial. Luego, la velocidad de conducción del calor en el interior es función de las propiedades termo-físicas del alimento (Farid, 2010).

Como se muestra en la Fig. 2, del total de la radiación incidente  $I_0$ , una parte se refleja  $I_r$ , otra parte se absorbe por la superficie  $I_{abs}$  y otra es transmitida  $I_{trans}$ .

El Teorema de Kirchoff afirma que, así como un cuerpo negro absorbe toda la energía que incide en él, todos los cuerpos reales emiten energía por el sólo hecho de estar por encima de una temperatura (Ozisik, 1973).

La emisividad se define como la fracción que se emite a partir de la energía que incide sobre un cuerpo. Es la transferencia de calor debida a la emisión de ondas electromagnéticas entre dos superficies y no necesita de un medio para llevarse a cabo. Todo cuerpo por encima del cero absoluto emite radiación. Es una propiedad de los materiales asociada a la capacidad o eficiencia de éste para emitir radiación comparada con un cuerpo negro. El coeficiente de emisividad ( $\varepsilon$ ) es un número adimensional que relaciona la habilidad de un objeto real para irradiar energía térmica, con la habilidad de irradiar si éste fuera un cuerpo negro:

$$\varepsilon = \frac{\text{Radiación emitida por un cuerpo real}}{\text{Radiación emitida por un cuerpo negro}} \quad \text{Ec.5}$$

Un cuerpo negro, por consiguiente, tiene un coeficiente  $\varepsilon = 1$ , mientras que en un objeto real, el coeficiente de emisividad  $\varepsilon$  siempre se mantiene menor a 1.

La cantidad de calor emitida por un cuerpo puede ser descripta por la ley de Stephan-Boltzman (Farid, 2010).

$$Q = \sigma T^4 \quad \text{Ec.6}$$

Donde  $\sigma$  es la constante de Boltzman ( $5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ ) y  $T$  es temperatura en grados Kelvin.

Los cuerpos no negros se caracterizan por su eficiencia de emisión radiante, a través de la emisividad:

$$Q = \varepsilon \sigma T^4 \quad \text{Ec.7}$$

La radiación neta de energía entre dos objetos puede ser descripta de acuerdo a Mohsenin (1980) como:

$$Q = \varepsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad \text{Ec.8}$$

Donde  $T_1$  y  $T_2$  son las temperaturas de los objetos sometidos a la transferencia de energía radiante.

El uso de esta energía dentro de hornos solares, trae ventajas como el calentamiento a temperaturas suaves, las cuales son óptimas para la deshidratación de la mayoría de frutas y vegetales, requiere de bajo capital y costos de mantenimiento, fácil construcción y disponibilidad de materiales. Puede ser utilizado como proceso individual o combinado complementando los procesos de secado convencionales, lo cual reduce la cantidad de combustible y energía utilizados. Además, los recursos energéticos que se utilizan son de tipo renovables, teniendo un menor impacto ambiental que otros métodos. Uno de los inconvenientes es el tiempo de exposición al calor que puede contribuir a la disminución en la calidad organoléptica del producto.

La deshidratación solar consiste básicamente en la utilización de la energía proveniente de la radiación solar para la evaporación del agua contenida en el alimento. Hay dos mecanismos básicos de transferencia de materia, la migración de la humedad desde el interior del producto a su superficie y la transferencia de la humedad desde la superficie



hasta el aire circundante, en forma de vapor de agua. La cinética de pérdida de humedad durante el secado solar sigue el desarrollo del secado tradicional, el mismo fue descrito en la sección 3.2.1 “Etapas del proceso de deshidratación”.

### **3.4. Deshidratación por microondas**

Otra alternativa para la deshidratación empleada en este trabajo es la aplicación de microondas. La deshidratación por microondas es aplicada como único proceso o combinado con otros métodos de secado tales como secado convectivo por aire caliente, deshidratación osmótica y otros procesos (Arballo y col, 2010).

Esta técnica ha adquirido un mayor interés, ya que emplea como forma de calentamiento la generación de energía térmica directamente en el interior del alimento, lo que permite superar excesivos tiempos de deshidratación con respecto a otros métodos y por consiguiente puede tener consecuencias directas en términos de eficiencia energética y calidad de los alimentos (Pardo y Zufía, 2012). Las microondas no contienen suficiente energía para romper enlaces químicos, se le ha llamado “energía radiante” y “radiación no ionizante”. El calentamiento empleando microondas es un fenómeno complejo, y depende de varios parámetros de los materiales incluyendo el volumen, densidad, forma, dimensión, composición y específicamente de las propiedades dieléctricas (Durance y Yaghmaee, 2011).

El objetivo principal del uso de microondas en las aplicaciones de deshidratación es acortar el tiempo de proceso. En los métodos tradicionales de secado en aire caliente, el

tiempo de proceso es limitado por la baja conductividad térmica de los productos al disminuir el contenido de agua. En el tratamiento con microondas, el calor se produce en el interior del material, reduciendo en gran medida el tiempo de transferencia de calor. El empleo de microondas en la deshidratación de alimentos, mediante la superación de las bajas tasas de transferencia de calor por conducción, ha dado lugar a mayores tasas de secado.

El uso de hornos microondas ha ganado popularidad en el procesamiento de alimentos debido a su capacidad para lograr altas velocidades de calentamiento, reducción significativa en el tiempo de cocción, calentamiento más uniforme, manipulación, facilidad de uso y bajo mantenimiento (Chandrasekaran y col, 2013).

Las microondas constituyen energía electromagnética que viaja a través del espacio y puede ser transmitida, reflejada o absorbida por la materia. Forman parte del espectro electromagnético, con frecuencias de 300 MHz a 300 GHz y longitudes de onda 1m a 1 mm, entre el infrarrojo y radiofrecuencias como se muestra en la Fig. 3. Se propagan a la velocidad de la luz con la capacidad de penetrar distancias significativas en los materiales, en donde pueden ser absorbidas por las moléculas tales como el agua y otras moléculas polares o cargadas (Durance y Yaghmaee, 2011). A diferencia de la radiación térmica, la acción del calentamiento con microondas depende fuertemente de la composición química del material a ser irradiado.

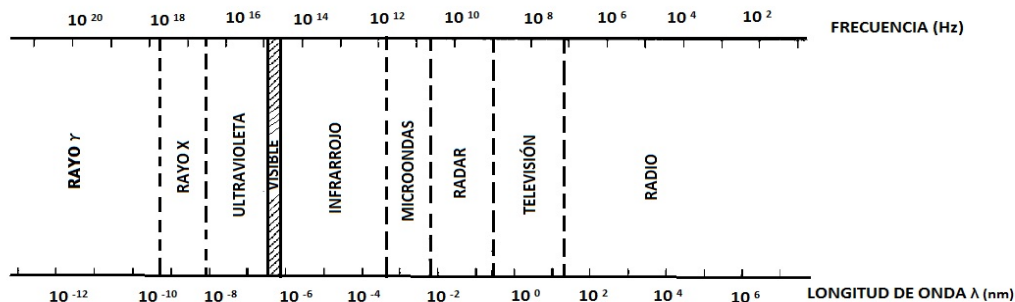


FIGURA 3. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.

La energía electromagnética es transformada en calor dentro del alimento como resultado de la interacción con las moléculas polares presentes en este último. Entre los mecanismos a escala molecular pueden mencionarse la conducción iónica y la rotación dipolar. Los materiales dieléctricos están compuestos por un núcleo atómico positivo envuelto en electrones negativos. Cuando se aplica un campo eléctrico, las cargas negativas son desplazadas con respecto al núcleo y son inducidos los momentos dipolares produciendo el fenómeno de polarización electrónica (Jones, 1986). Dicho fenómeno genera que las cargas locales se muevan en consonancia con el campo eléctrico aplicado. El efecto de polarización de las cargas genera un desfase entre la corriente resultante y el campo eléctrico aplicado generando la disipación de la potencia dentro del alimento. Esta disipación ocurre en forma de calor (Arballo, 2013).

La capacidad de un material para convertir la energía de las microondas en calor es debida a sus propiedades dieléctricas. La componente real de la propiedad dieléctrica, denominada permitividad, representa la capacidad de almacenar la energía eléctrica y la parte imaginaria de la propiedad dieléctrica, denominada factor de pérdida, representa la

capacidad para convertir la energía electromagnética en calor (Chandrasekaran y col, 2013).

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - \varepsilon'' i \quad \text{Ec.9}$$

Donde  $\varepsilon'$  y  $\varepsilon''$  son la permitividad y el factor de pérdida y  $\varepsilon^*$  es la permisividad relativa compleja.

El factor de disipación o tangente de pérdida ( $\tan \delta$ ) es usado generalmente como un parámetro dieléctrico descriptivo y se define como:

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad \text{Ec.10}$$

Cuando un alimento es sometido a un campo de microondas para su calentamiento, las propiedades dieléctricas determinan el comportamiento de dichos materiales. En consecuencia se puede expresar la relación entre las propiedades dieléctricas y la potencia disipada a través de la siguiente relación (Datta, 2007):

$$P = 55,63 f \varepsilon'' E^2 \times 10^{-12} \left( \frac{\text{W}}{\text{m}^3} \right) \quad \text{Ec.11}$$

donde  $f$  es la frecuencia del campo electromagnético producido por las microondas ( $\text{s}^{-1}$ ) y  $E$  representa la intensidad del campo eléctrico ( $\text{V/m}$ ). La forma en la que un material se calienta como resultado de la interacción con las microondas depende también de otras propiedades tales como el calor específico, la conductividad térmica y la densidad del material. El cambio en la temperatura y la humedad del alimento afectan en forma determinante las condiciones del calentamiento dieléctrico.

La dependencia directa de la potencia disipada dentro del alimento con las propiedades dieléctricas puede visualizarse claramente para el caso de que  $E$  y  $f$  se mantengan constantes (Ec.11). La velocidad de generación de calor por unidad de volumen ( $P$ ) es proporcional al factor de pérdida dieléctrica ( $\epsilon''$ ). El efecto de la frecuencia de la radiación es más complicado; por una parte, la velocidad de la generación de calor es proporcional a la frecuencia  $f$  (Ec.11). Por otra parte, el factor de pérdida en sí mismo es dependiente de la frecuencia, aumentando a un máximo a un cierto valor, llamada crítico (Meredith, 1998).

En relación a la penetración de energía de las microondas, las propiedades dieléctricas son muy importantes para evaluar dicho efecto. Por ejemplo, para una onda plana propagándose en la dirección  $x$ , la magnitud de la intensidad del campo eléctrico se define como:

$$|E| = E_0 e^{-\alpha x} \quad \text{Ec.12}$$

donde  $E_0$  es la intensidad del campo eléctrico en la superficie de la placa,  $\alpha$  es el factor de atenuación y  $x$  es la distancia desde la superficie en la dirección de propagación de la onda dentro del material.

En la Ec 12. puede observarse que la intensidad del campo eléctrico  $E$  decrece a medida que la onda avanza dentro del material, y considerando que la potencia disipada  $P$  es proporcional al cuadrado de la intensidad del campo  $E$  (Ec. 11), el decaimiento de la disipación de potencia dentro del alimento puede definirse como sigue:

$$P = P_0 e^{-2\alpha x} \quad \text{Ec.13}$$

donde  $P_0$  es la potencia disipada en la superficie del material.

Como la mayor parte de los alimentos tienen un alto contenido de humedad y un factor de pérdida alto, ellos fácilmente absorben las microondas (Ec. 11). Sin embargo, en el caso de alimentos con bajo contenido de humedad debe tenerse cuidado con la formación de un arco foto voltaico que produce una gran elevación de temperatura provocando el quemado del producto.

Generalmente, los alimentos se componen de una mezcla de material orgánico, agua y sal. La pérdida dieléctrica a una frecuencia particular aumenta con la adición de sal. Las soluciones salinas actúan como conductores en la presencia del campo electromagnético, provocando un aumento en el factor de pérdida dieléctrica con la temperatura (İÇİEr y Baysal, 2004).

Una mejora importante en la distribución de la temperatura podría proporcionar un buen margen para la utilización de microondas en varios procesos industriales (Vadivambal y Jayas, 2010).

Los hornos de microondas consisten principalmente de un generador de microondas (magnetron), tubos de aluminio llamados guías de onda, y una cavidad metálica (Gunasekaran, 2002) (Fig. 4).

El generador de microondas es un diodo cilíndrico que está compuesto por un tubo de cobre sellado. El tubo contiene platos de cobre que señalan hacia el centro como rayos en una rueda. Este ensamblado es llamado ánodo y tiene un filamento de cable en forma de espiral (cátodo) en el centro. Cuando se aplica un alto voltaje (4000 V), el cátodo produce

electrones libres, que dejan su energía para producir microondas que oscilan rápidamente, las que son dirigidas hacia una guía de ondas. La guía refleja el campo eléctrico internamente y así lo transfiere a la cavidad de resonancia (Fellows, 2000).

Durante la deshidratación por microondas se observan tres etapas diferentes. Durante la primera etapa la muestra absorbe toda la potencia aplicada y se denomina de total absorción. En la segunda etapa, hay un descenso en la absorción de las microondas a medida que avanza el secado y finalmente en la última parte del proceso la absorción de las microondas es casi nula después de cierto contenido mínimo de humedad y toda la potencia se pierde.

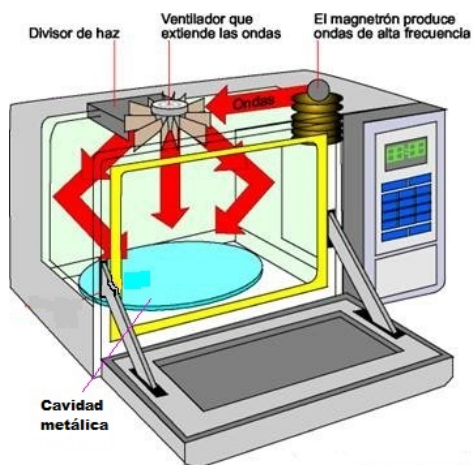


FIGURA 4. ESQUEMA DE UN HORNO MICROONDAS.

### 3.5. Mecanismos de transferencia de materia

Se puede describir el proceso de transferencia de materia en los alimentos con un modelo de medios porosos, donde las fuerzas de succión capilar y la adsorción son los mecanismos de retención de agua.

La transferencia de materia ocurre bajo tres mecanismos principales como difusión molecular, la difusión capilar (para líquidos) y la convección (filtración o el flujo de Darcy).

- **Difusión molecular:** Los gases tales como el vapor de agua y el aire en los medios porosos se pueden mover por difusión molecular si los poros son lo suficientemente grandes. Este mecanismo se puede describir a través de la ley de Fick de la difusión:

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad \text{Ec 14}$$

Donde  $D$  es la difusividad molecular,  $c$  es la concentración y  $x$  la distancia.

La difusividad molecular puede ser calculada considerando la difusión dentro del medio poroso utilizando el factor de tortuosidad  $\tau$  y la porosidad  $\varepsilon$ :

$$D_{eff} = \frac{D\varepsilon}{\tau} \quad \text{Ec.15}$$

Donde  $D_{eff}$  es la difusividad efectiva en el medio poroso. Cuando hay una mezcla gaseosa de vapor y aire, al sistema se lo puede tratar considerando válida la ley de los gases ideales.

- **Convectivo (flujo Darcy):** se puede definir el movimiento de un líquido en un material poroso mediante la ley de Darcy:

$$J^v = -K \frac{\partial H}{\partial s} \quad \text{Ec.16}$$



Donde  $J^v$  es el flujo volumétrico expresado en  $m^3/m^2s$ ,  $H$  es el potencial hidráulico en  $m$ ,  $s$  es la distancia a lo largo del flujo expresado en  $m$ , y  $K$  es la constante de proporcionalidad, la cual se denomina conductividad hidráulica ( $m/s$ ).

La conductividad hidráulica  $K$  representa la facilidad con la cual el fluido puede ser transportado a través de una matriz porosa y se relaciona con la permeabilidad a través de la siguiente relación:

$$K = \frac{\kappa \rho g}{\mu} \quad \text{Ec. 17}$$

Donde la  $\kappa$  es la permeabilidad del material,  $\mu$  es la viscosidad y  $\rho$  es la densidad del fluido.

Cuando el sólido está saturado con el líquido, como en los alimentos muy húmedos donde los poros se llenan completamente de agua, tanto la contribución de la matriz como las contribuciones de los fluidos son constantes, esto conduce a una conductividad hidráulica constante de un sólido dado saturado por un fluido en particular.

- **Difusión por capilaridad:** el flujo capilar ocurre debido a la diferencia entre la atracción relativa de las moléculas del líquido entre ellas y con las paredes del sólido. La capilaridad es un fenómeno por el cual el tejido de un alimento no pierde completamente el agua por gravedad o por evaporación. Este mecanismo es importante en el procesamiento de alimentos, especialmente en el secado.

La Ley de Darcy describe este mecanismo donde el potencial  $H$  es negativo debido a la unión del agua de los capilares y las fuerzas atractivas de las paredes:

$$J = \rho_{\text{liquido}} K \frac{\partial H}{\partial s} \quad \text{Ec. 18}$$

donde J es el flujo másico expresado en Kg/m<sup>2</sup>s.

## 4. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1. Materiales

Se adquirieron muestras de frambuesa (*Rubus idaneus*), kiwi (*Actinidia chinensis*), tomate (*Solanum lycopersicum*) y acelga (*Beta vulgaris*) en un supermercado local (La Plata, Argentina). Previo al análisis, los productos fueron seleccionados visualmente, según su color y tamaño, y luego se lavaron con agua potable.

Para los procesos de deshidratación, los tomates fueron empleados con piel. En el caso de los kiwis ésta fue retirada previamente. Ambos productos fueron cortados en rodajas de aproximadamente 4.5 cm de diámetro y 1.5 cm de espesor. Las frambuesas y las hojas de acelga se utilizaron enteras.

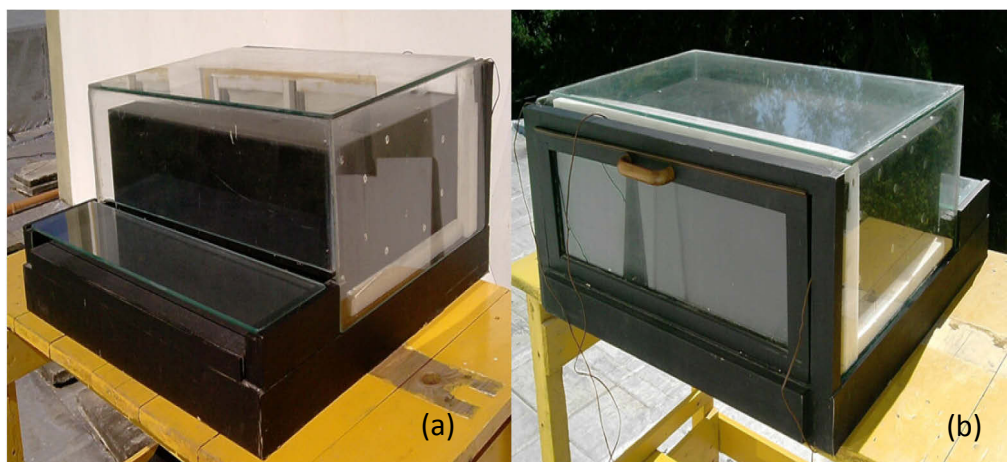
### 4.2. Procesos de deshidratación

Las muestras de los diferentes productos fueron sometidas a los siguientes procesos:

#### 4.2.1. Deshidratación Solar

Se empleó un horno solar fabricado con un material galvanizado, diseñado y construido en el Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos (CIDCA). El equipo

consiste en una cámara de 60 cm de largo, 40 cm de ancho y 15 cm de altura (Fig. 5). El material de construcción fue pintado de color negro a fin de funcionar como un cuerpo negro, absorbiendo la radiación solar y re emitiéndola hacia el interior del horno. Esta caja negra se encuentra revestida por una caja de vidrio, la misma actúa reteniendo la radiación infrarroja. El vidrio es un material transparente a la radiación solar de alta energía y de onda corta, pero opaco a las radiaciones infrarrojas de onda larga emitidas por la superficie del absorbedor (Campañone y col, 2012). El horno posee una puerta frontal por la cual se ingresaron las muestras, las que fueron colocadas sobre una rejilla metálica de soporte. El aire ingresa al horno por la parte posterior, la cual contiene una abertura rectangular construida del mismo material del horno y cubierta con vidrio, recorriendo el interior del horno por convección natural.



**FIGURA 5. EQUIPO DE SECADO SOLAR: A) VISTA POSTERIOR, B) VISTA FRONTAL.**

Los experimentos fueron llevados a cabo durante los meses de Marzo, Abril y Mayo de 2012, en la ciudad de La Plata, cuyas coordenadas geográficas de los puntos extremos son:

latitud 34° 52' de latitud sur y 57° 54' de longitud oeste a 9.87 m sobre el nivel del mar, el horno prototipo se orientó hacia el norte y se lo expuso a la luz solar para el proceso de deshidratación.

Durante el proceso de deshidratación se registró la temperatura del ambiente, de la chapa superior, del interior del horno y del interior del alimento mediante termocuplas tipo “T” Cu-Ct asociadas a un adquisidor de datos (Keithley, USA). Estas mediciones se realizaron cada hora. Además, la humedad relativa del ambiente se registró con un higrómetro (Testo 125-H2, Alemania) en función del tiempo.

El peso de las muestras se registró antes del ingreso al horno mediante una balanza granataria (Dever Instrument XE-4100, USA), siendo 120 gramos el peso medio de las frambuesas, 247 gramos de kiwis, 375 gramos de tomates y 36 gramos de hojas de acelga. Los ensayos se realizaron en forma individual para cada uno de los productos, los experimentos de deshidratación se realizaron por triplicado.

El peso de las muestras se registró al comienzo y al finalizar cada jornada, definiendo jornada como el tiempo de permanencia dentro del horno desde el ingreso hasta que la temperatura dentro del horno descendió por debajo de 30°C. La jornada tuvo un valor máximo 6 horas por día.

Al finalizar la jornada, se pesaron las muestras y se calculó la humedad en relación a la pérdida de peso, a modo de seguimiento de la cinética de deshidratación.

Los productos se guardaron en bolsas de polietileno de baja densidad (Ziploc) y se colocaron en una cámara a 4°C hasta el día siguiente. Los ensayos se realizaron en días consecutivos.

El proceso de deshidratación se detuvo cuando las muestras alcanzaron la humedad requerida para cada alimento, según el Código Alimentario Argentino (CAA), capítulo XI - Art 903 y 824: “Las frutas secas no deberá contener más de 25% de agua, mientras las hortalizas no presentarán un contenido en agua superior a 7%”.

#### **4.2.2. Deshidratación por microondas**

La deshidratación por microondas se realizó en un equipo comercial (ATMA, potencia máxima nominal 700 W, frecuencia 2450 MHz) (Fig. 6).



**FIGURA 6. HORNO MICROONDAS.**

Para todos los productos se usó un ciclo de potencias del 17% (potencia 119W) para evitar el sobrecalentamiento de las muestras, con un tiempo determinado según el producto y el contenido de humedad del mismo. Las muestras fueron uniformemente distribuidas sobre una rejilla plástica que descansaba sobre el plato giratorio del microondas.

Las muestras se pesaron antes de ingresar al horno microondas, empleando una balanza granataria (Denver, USA). Los pesos medios iniciales fueron 234 gramos de rodajas de kiwi, 292 gramos de rodajas de tomate y 17 gramos de hojas de acelga.

Para medir la temperatura superficial durante este proceso, se utilizó un termómetro infrarrojo (Handheld Infrared Thermometer OMEGASCOPE, USA) y la temperatura interna del producto se registró empleando una termocupla tipo "T". Las mediciones fueron tomadas cada 30 minutos. En los mismos intervalos de tiempo se registró el peso en una balanza granataria (Dever Instrument XE-4100, USA). En estos intervalos de tiempo, la totalidad de las muestras se retiraron del horno y fueron pesadas. En los casos de deshidratación prolongada, la misma cantidad de producto se ingresó al horno y se retiró en tiempos definidos. En el caso de hojas de acelga se registró el peso y la temperatura superficial antes y después del secado únicamente, debido al corto tiempo de procesamiento. Todos los ensayos se realizaron por triplicado para cada uno de los productos.

El proceso de deshidratación finalizó cuando se alcanzaron los valores de humedad requeridos por Código Alimentario Argentino para cada uno de los productos.

## 5. CARACTERIZACIÓN

### 5.1. Determinación de Humedad

La humedad de los productos se determinó mediante el método gravimétrico (AOAC, 1985) usando una estufa al vacío (modelo Gallenkamp) a 70°C hasta peso constante. El contenido de humedad porcentual (H%) se calculó según:

$$H(\%) = \frac{(P_i - P_f)100}{P_i} \quad \text{Ec. 19}$$

Donde  $P_i$  es el peso inicial de la muestra antes del ingreso a la estufa y  $P_f$  es el peso final de la muestra.

### 5.2. Determinación de la actividad antioxidante

Se determinó la actividad antioxidante por medio del método del radical libre (Soler-Rivas y col, 2000) con algunas modificaciones. Se hace reaccionar una cantidad conocida de 2,2-difenil-1-picril-hidracilo DPPH• a una concentración de 50 ppm en etanol al 96% con una concentración conocida del antioxidante del extracto a evaluar.

Se prepararon extractos de los productos deshidratados de cada uno de los ensayos realizados en el horno solar, microondas y al mismo tiempo para los productos frescos. Los ensayos se hicieron por triplicado.

Para la preparación de los extractos, se pesó 1g de muestra, se le agregó 10 ml de etanol al 96% y se centrifugó a 11.000 rpm a 4°C durante 10 minutos. A partir del extracto se tomaron alícuotas de 10, 20, 30 y 40 µl completando un volumen de 500 µl con etanol. Se

preparó una solución de DPPH• de 50 ppm y se agregó 1 ml de la misma a cada una de las diluciones de los extractos. Se dejó reaccionar durante una hora y luego las muestras fueron medidas en un espectrofotómetro Hitachi (modelo U-1900) a 515nm. Simultáneamente se preparó un control con 500 µl de etanol al 96% medido a la misma longitud de onda. El resultado se expresó utilizando el valor CE<sub>50</sub>, que se define como la concentración de antioxidante que causa una disminución del 50% en el DPPH• (Chen y col, 2013).

Se calculó el porcentaje de inhibición (% I) del radical libre DPPH•, con la siguiente ecuación:

$$\%I = \left( \frac{(Abs_b - Abs_m)}{Abs_b} \right) 100 \quad \text{Ec. 20}$$

Donde Abs<sub>b</sub> es la absorbancia del blanco y Abs<sub>m</sub> es la absorbancia de la muestra.

### 5.3. Determinación del color

Se evaluó el color de las muestras frescas y deshidratadas por ambos métodos; solar y microondas; con diez repeticiones, empleando un colorímetro Minolta CR-300 que realiza la evaluación del color basado en todo el espectro visible, permitiendo obtener el perfil cromático real del producto. Se utilizó la escala Hunter-Lab; los parámetros obtenidos son los definidos por la CIE (Commission International de l'Eclairage): la luminosidad L\* y la cromaticidad, definida a través de los parámetros a\* y b\*. El parámetro L\* varía desde 100 para un blanco perfecto y 0 para el negro. El parámetro a\* representa el color rojo cuando



es positivo, y verde cuando es negativo y  $b^*$  representa el color amarillo cuando es positivo y azul cuando es negativo.

El equipo fue calibrado usando un set de tres placas provistas por el fabricante. Se calcularon las diferencias en los tres parámetros (luminosidad, cromaticidad  $a^*$  y cromaticidad  $b^*$ ) para los productos secos en relación a los frescos. Estas diferencias son expresadas como:

$\Delta L^*$  = es la diferencia de luminosidad entre la muestra fresca y la seca

$\Delta a^*$  = es la diferencia de la relación rojo/verde entre la muestra fresca y la seca

$\Delta b^*$  = es la diferencia de la relación amarillo/azul entre la muestra fresca y la seca.

La variación de estos parámetros se muestra en la Fig. 7.

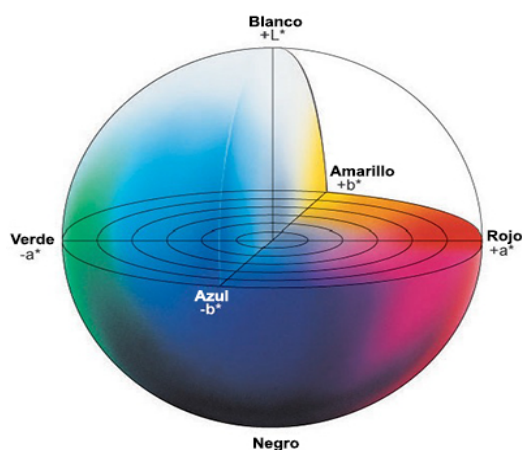


FIGURA 7. CARTA DE COLOR.

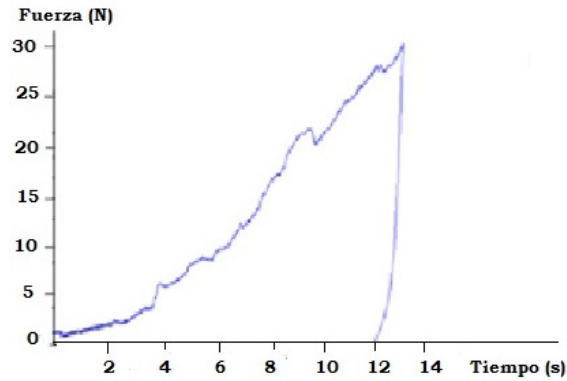
#### 5.4. Determinación de Textura

Para este ensayo se utilizó el equipo TA.XT2i – Stable Micro Systems. Está compuesto por un plato que sostiene la muestra a analizar y un brazo donde se coloca el elemento que

ejerce la fuerza sobre las mismas; las curvas de relajación se registran a través del software Texture Expert Exceed instalado en una PC conectado al equipo.

Se realizó un ensayo de compresión, usando un disco de 4.5 cm de diámetro que presiona la muestra una cierta distancia, según los parámetros utilizados en el equipo. La calibración del equipo se lleva a cabo por peso muerto (se emplea una pesa de 5kg). La velocidad de compresión fue de 0.3 mm/s para todos los productos excepto para la acelga a la cual se realizó un ensayo de punción a partir del cual se obtuvo sólo el valor de fuerza de ruptura aplicada a la muestra y con una velocidad de ensayo de 0.5 mm/s.

Los ensayos se realizaron sobre las muestras frescas y secas, manteniendo la misma forma en la cual fueron deshidratadas: en rodajas para kiwi y tomate y enteras para frambuesa y acelga. A partir del pico que presentan las curvas obtenidas durante los ensayos, se determinó el parámetro fuerza máxima ó dureza (F1) que se define físicamente como la fuerza máxima ejercida sobre la muestra. Este parámetro permite determinar la dureza de la muestra y es expresado con unidades de fuerza (N). Los valores informados, son directamente los correspondientes a la fuerza ejercida sobre cada uno de los productos, esquematizado en la Fig. 8.



**FIGURA 8. PERFILES DE TEXTURA-ENSAYO DE COMPRESIÓN.**

### **5.5. Análisis de la microestructura**

Se estudió la microestructura de las muestras frescas y procesadas empleando Microscopía Electrónica de Barrido Ambiental (ESEM). Las micrografías fueron obtenidas por un microscopio FEI-Quanta 200 (Holanda) a fin de determinar el daño sufrido en el tejido durante el proceso de deshidratación; se examinaron empleando un voltaje de aceleración de 20kv. A las muestras de kiwi y tomate, se les realizó un corte transversal para observar la estructura interna, en cambio, en la frambuesa y acelga se observó sólo la estructura superficial.

A partir de las imágenes, se observaron los tejidos de las muestras de frutas y hortalizas frescas y deshidratadas, lo cual permitió analizar y comparar los daños sufridos por la aplicación de los diferentes métodos de deshidratación.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 6.1. Secado solar

#### 6.1.1. Historias térmicas

En la Fig. 9 se muestra el comportamiento de la temperatura en función del tiempo durante el proceso de secado solar. Las muestras mostraron un aumento inicial en la temperatura hasta alcanzar un valor sostenido en el tiempo. En todos los casos, dicha temperatura disminuyó hacia el final de cada jornada.

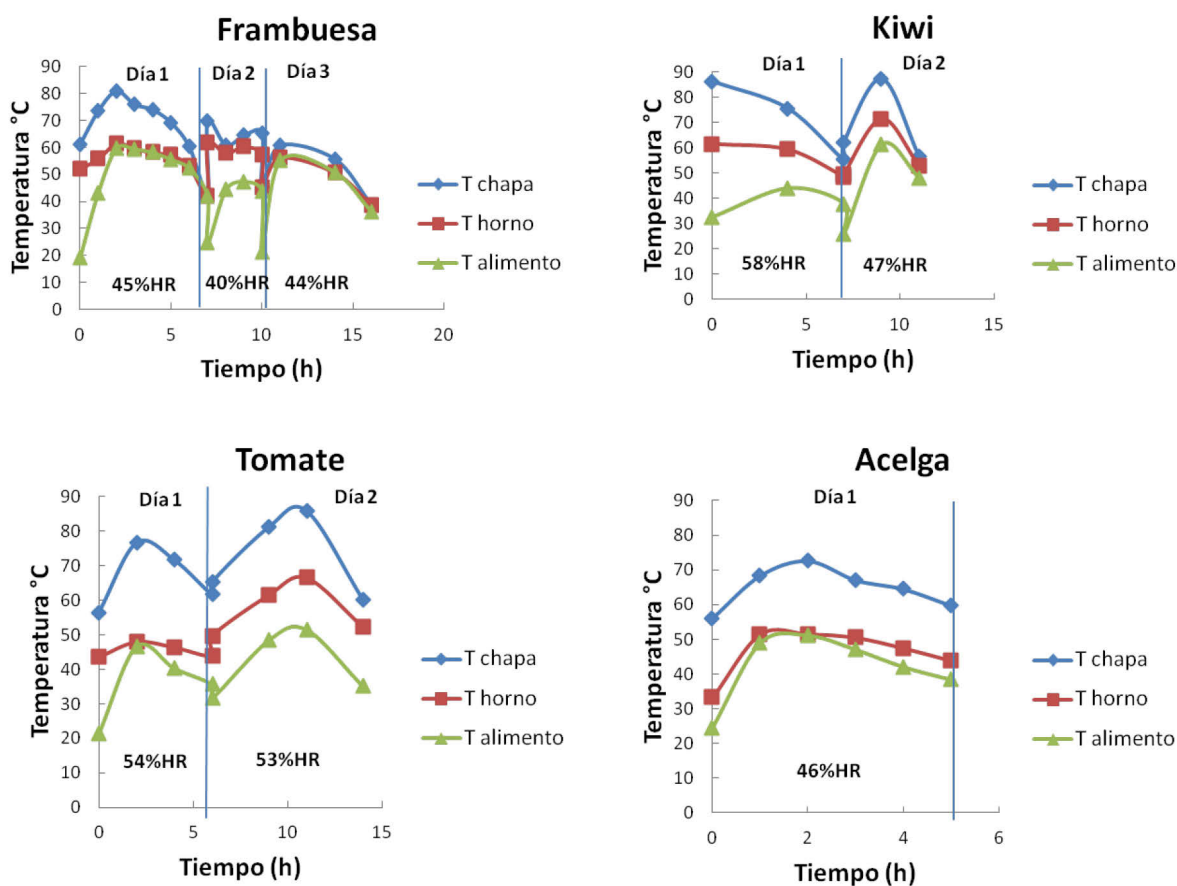


FIGURA 9. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DURANTE EL PROCESO DE SECADO SOLAR (LAS LÍNEAS VERTICALES REPRESENTAN UNA JORNADA DE SECADO)

El aumento en la temperatura de los productos fue consecuente con el incremento de la temperatura de la chapa y a su vez con la interna del horno. Cabe destacar, que todos los ensayos se realizaron en condiciones bajas de humedad relativa ambiente, variando entre 40 y 58%.

Los tiempos y las temperaturas medias y máximas durante el secado obtenidos para cada producto se muestran en la Tabla 1.

**TABLA 1. TEMPERATURA Y HUMEDAD MEDIA DE LOS PRODUCTOS POR SECADO SOLAR.**

<b>Alimento</b>	<b>Tiempo de secado (h)</b>	<b>Temp. media (°C)</b>	<b>Temp. Max (°C)</b>	<b>Humedad inicial (%)</b>	<b>Humedad final (%)</b>
<b>Frambuesa</b>	16	49.7 ± 7	59.6 ± 1	72.21 ± 3.3	14.01 ± 1.2
<b>Kiwi</b>	11	47.8 ± 10	61.3 ± 1	81.81 ± 1.6	19.86 ± 1.0
<b>Tomate</b>	14	42.9 ± 7	51.5 ± 1	91.52 ± 1.0	17.27 ± 1.0
<b>Acelga</b>	5	45.6 ± 5	51.1 ± 1	86.55 ± 0.0	2.49 ± 0.4

El tiempo de procesamiento fue menor para la acelga. Este producto mostró una reducción en su contenido de humedad de alrededor del 96% en 5 h. En el caso de las muestras de kiwi se observó una pérdida de agua del 76% en un tiempo de 11 h. Se obtuvieron similares porcentajes de reducción de humedad (alrededor del 80%) para las muestras de tomate y frambuesa. Sin embargo, este último producto requirió mayores tiempos de secado. El fruto está formado por varias drupas que pueden ser la causa de una evaporación lenta del agua; por otro lado, el kiwi y el tomate tienen una estructura

diferente y al ser pelados y cortados en rodajas aumentan la superficie de exposición hacia el interior del horno.

En un estudio de secado solar de zanahorias realizado por Prakash y col (2004), los autores reportaron un tiempo de secado de 16 horas partiendo de una humedad de 80-90% hasta alcanzar 6% de humedad, mostrando una mayor temperatura en horas del mediodía. En otro estudio, Dissa y col (2009) secaron rodajas de mango en tres días, alcanzando una humedad final de 16%. Por otro lado, Tunde-Akintunde (2011) registró un tiempo de secado entre 45 y 70 h a una temperatura promedio de 45°C para la deshidratación solar de ajíes rojos enteros.

#### **6.1.2. Pérdida de peso**

En la Fig. 10 se muestran los resultados de la pérdida de peso en función del tiempo de secado de los productos frutihortícolas. Para poder comparar los valores de pérdida peso en función del tiempo entre los distintos experimentos, se emplearon valores normalizados respecto al peso inicial  $\Delta P/P_0$ . Los valores que se informan corresponden al promedio de los ensayos para cada uno de los productos.

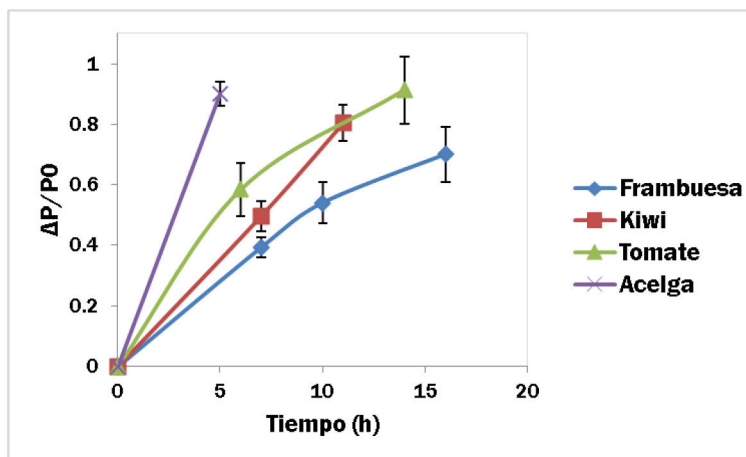


FIGURA 10. PÉRDIDA DE PESO, SECADO SOLAR.

En la Fig. 10 se observa que la relación de pérdida de peso adimensional ( $\Delta P/P_0$ ) de los productos es directamente proporcional al tiempo de secado para el caso de frambuesa, kiwi y acelga; se desvía levemente de la linealidad para el caso de rodajas de tomate. La acelga muestra un aumento rápido de pérdida de peso comparado con los demás productos a cualquier tiempo. La velocidad de pérdida de peso se calculó a través de las pendientes de las rectas, con una velocidad de secado de  $0.18 \text{ h}^{-1}$  para las hojas de acelga; valores menores se obtuvieron para el tomate y el kiwi, mostrando una similar tendencia en el comportamiento de la pérdida de peso durante las primeras horas de secado (aproximadamente hasta las primeras 4 h de proceso), con velocidades de  $0.08 \text{ h}^{-1}$  y  $0.07 \text{ h}^{-1}$  respectivamente. La frambuesa fue el producto que presentó el menor valor de velocidad, siendo  $0.05 \text{ h}^{-1}$  resultando el producto con mayor tiempo requerido para alcanzar aproximadamente un mismo valor de pérdida de peso.

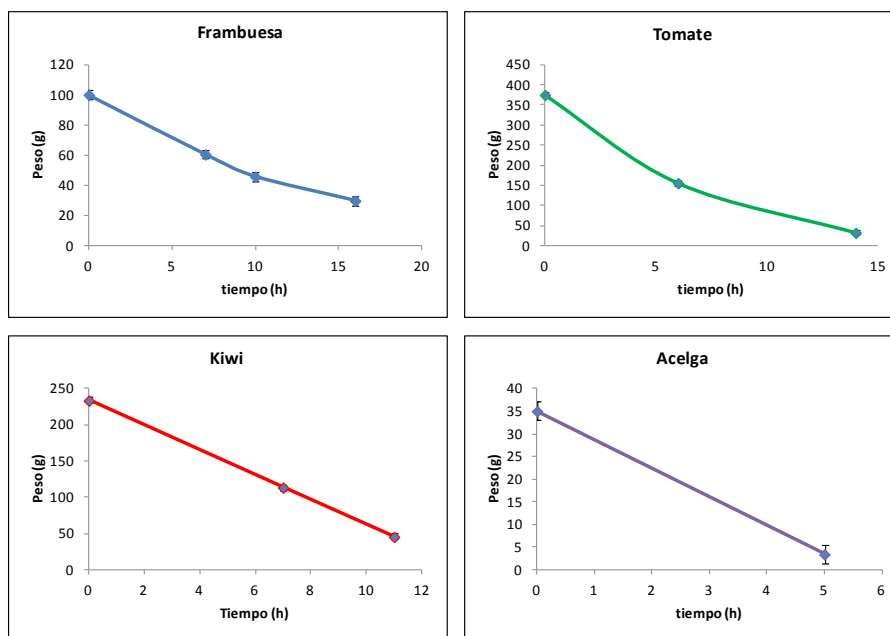
El comportamiento observado podría atribuirse a las diferentes barreras físicas (piel, drupas y vellosidades) para la deshidratación. En nuestro estudio, la forma de exponer los productos al secado (enteros o cortados) podría influir sobre la pérdida de peso. Además

uno de los factores que determina la cinética de deshidratación es la relación del área expuesta por unidad de volumen. Esta relación es máxima para el caso de acelgas y presenta toda su superficie expuesta a la radiación interna del horno.

En la Fig. 11 se muestran las curvas de deshidratación para cada producto en particular. Como se puede observar en todos los casos, el mecanismo dominante es la transferencia de energía, etapa A-C (Sección 3.2.1), donde el agua está disponible para ser removida por evaporación. Los valores de humedad final oscilaron entre el 14 y 20 % para todos los productos excepto la acelga, con lo cual, se dispone de agua libre para continuar el proceso de deshidratación. En el caso de acelga, el valor del agua ligada en las condiciones de humedad y temperatura de procesamiento es menor al 5% de la humedad inicial, por lo tanto, también se dispone de agua libre para la evaporación.

Con respecto a las condiciones ambientales, cabe destacar que los niveles alcanzados de temperatura interna del horno en los ensayos osciló entre 50 y 70°C, y la humedad relativa como ya se mencionó entre 40 y 58%. Se puede considerar que estos parámetros no fueron los determinantes para las cinéticas de deshidratación, como sí lo fue, el tipo de producto y la forma de exposición de los mismos.





**FIGURA 11. PÉRDIDA DE PESO PARA CADA PRODUCTO**

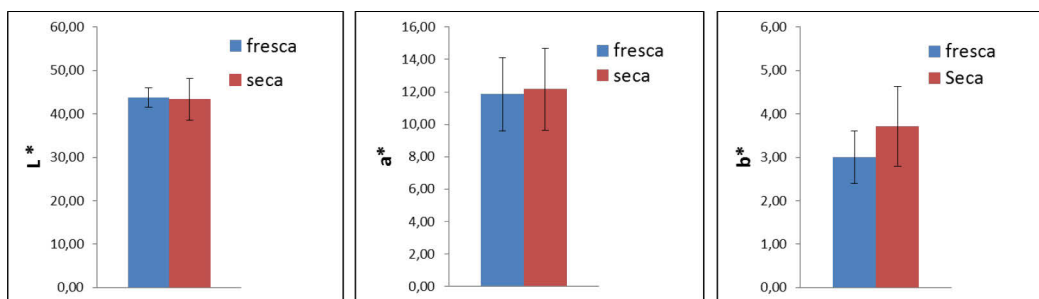
### 6.1.3. Color

A fin de evaluar la alteración del color superficial de los productos debido al proceso de secado solar, se analizó la variación en la luminosidad ( $L^*$ ) y la cromaticidad  $a^*$  y  $b^*$ .

El color del producto final es un aspecto importante de la calidad. Cuando ocurre el quemado o caramelización durante el proceso de secado, usualmente resulta en un color oscuro y restos de sabor y aroma desagradables; mientras que un producto con color claro, generalmente representa mejor calidad (Li y col, 2010).

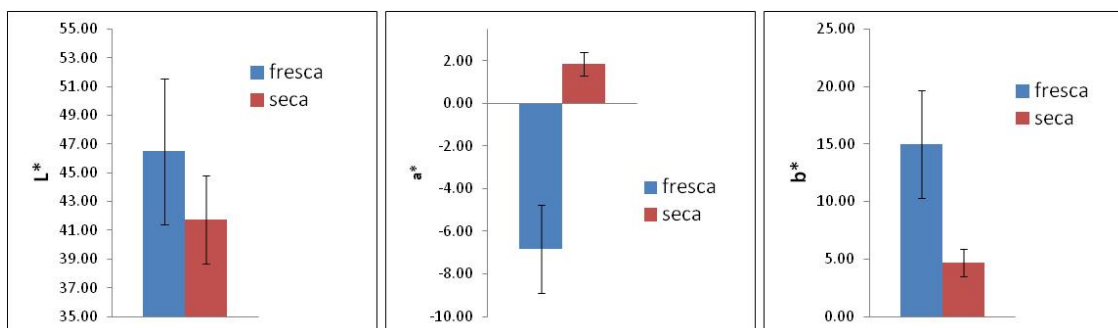
Los parámetros de color obtenidos en las muestras frescas y secas en el secado solar se muestran en las Figuras 12, 13, 14 y 15.

La frambuesa no mostró diferencias significativas para ningún parámetro (luminosidad y cromaticidad  $a^*$  y  $b^*$ ) con un valor  $P > 0.05$  (Fig. 12). Sin embargo se observó una disminución en la luminosidad y un aumento para los dos parámetros de cromaticidad.



**FIGURA 12. PARÁMETROS DE COLOR PARA LA FRAMBUESA (SECADO SOLAR).**

En el kiwi aunque la luminosidad disminuyó, no mostró una diferencia significativa (Fig. 13), mientras que los parámetros de cromaticidad  $a^*$  y  $b^*$  mostraron diferencias marcadas con respecto al producto fresco. Hubo un cambio de tonalidad hacia el color rojo y una disminución del color amarillo ( $a^*$ ) de casi tres veces respecto al valor del producto fresco, dando como resultado un producto con aspecto acaramelado. Esto puede atribuirse a las reacciones de pardeamiento no enzimático o degradación de pigmentos como consecuencia del calentamiento en la superficie del producto (Wanyo y col, 2011).



**FIGURA 13. PARÁMETROS DE COLOR PARA EL KIWI (SECADO SOLAR).**

El tomate también mostró diferencias significativas para la cromaticidad  $a^*$  y  $b^*$  resultando una disminución del color rojo y el amarillo, mostrando un producto más oscuro color marrón, posiblemente a causa de la concentración de los pigmentos; la luminosidad en cambio no fue afectada (Fig. 14). Resultados similares fueron observados por Krokida y Maroulis, (1999) en diferentes productos deshidratados, en cuanto a la conservación de la luminosidad de los productos secos, comparados con los frescos.

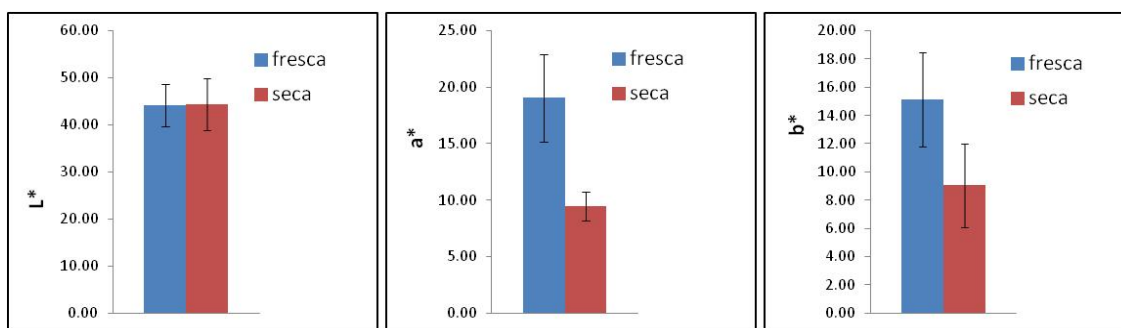


FIGURA 14. PARÁMETROS DE COLOR PARA EL TOMATE (SECADO SOLAR).

Los mayores cambios fueron observados en la acelga, con una diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) observándose un aumento de luminosidad. Asimismo, hubo un aumento en la cromaticidad  $b^*$  mostrando una mayor tonalidad amarilla, junto con un aumento de la cromaticidad  $a^*$ , descendiendo el tono verde de las hojas (Fig. 14).

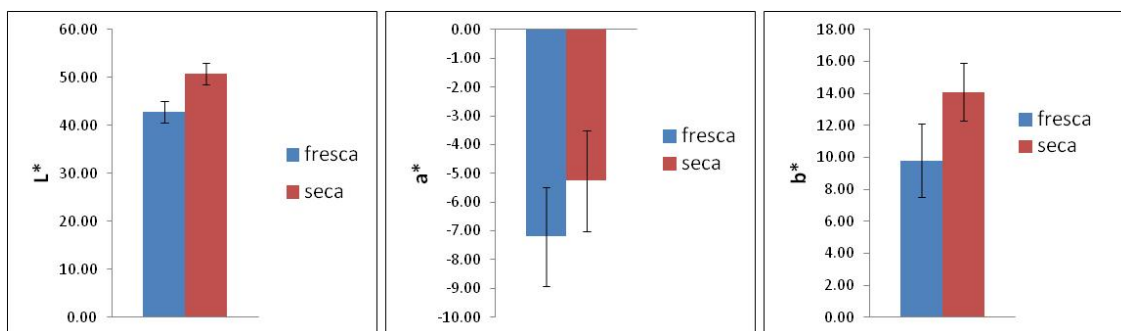


FIGURA 15. PARÁMETRO DE COLOR PARA LA ACELGA (SECADO SOLAR).

### 6.1.3. Textura

La dureza es un atributo de calidad importante en la selección de productos. La comercialización de productos aceptables requiere de un control especial en los cambios de textura lo cual se puede realizar conociendo los factores que afectan este atributo (Rodoni y col, 2009). Por tal razón es de interés estudiar la dureza tanto de los productos frescos como de los deshidratados y la diferencia entre ellos.

Los valores de dureza (N) de los productos estudiados se muestran en la Tabla 2.

**TABLA 2. DUREZA (N) DE LOS PRODUCTOS FRESCOS Y SECOS.**

	Dureza (N)	
	Fresco	Seco
<b>Frambuesa</b>	$2.63 \pm 0.53^a$	$4.40 \pm 0.26^b$
<b>Kiwi</b>	$25.65 \pm 3.02^c$	$30.17 \pm 0.12^c$
<b>Tomate</b>	$97.50 \pm 10.4^d$	$5.64 \pm 0.91^f$
<b>Acelga</b>	$1.37 \pm 0.14^g$	$1.55 \pm 0.19^g$

**\*Letras iguales, indican que no hay diferencias significativas ( $P > 0.05$ ).**

Se analizaron los parámetros de textura de los productos frescos y secos (Fig. 16), donde se observa la variación de la dureza en (N) de cada producto seco en relación al mismo fresco.

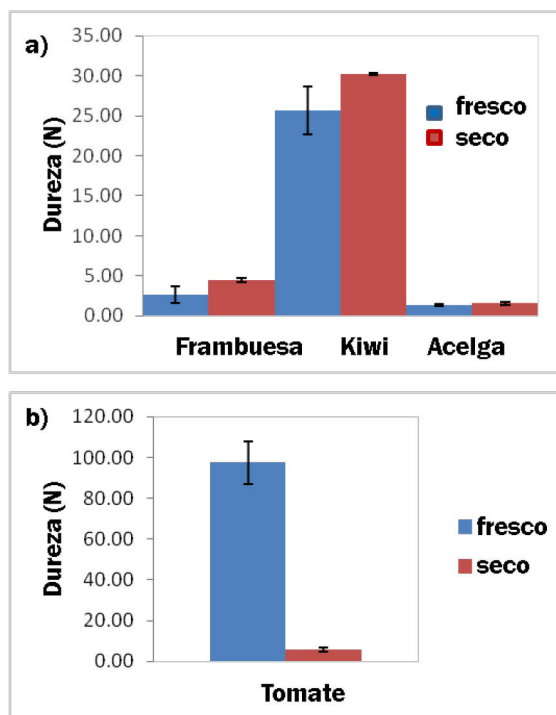
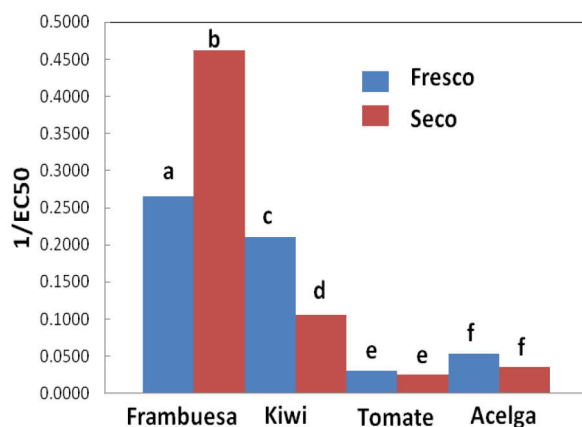


FIGURA 16. DUREZA (N) DE LOS ALIMENTOS POR SECADO SOLAR. A) FRAMBUESA, KIWI, ACELGA. B) TOMATE.

Se observó un aumento de dureza en la frambuesa seca de 1.76 N con respecto a la fresca, mostrando un producto más duro y compacto (Fig.16a). Por el contrario, el tomate presentó una textura más flexible y blanda por la disminución de la dureza de un 94% respecto al producto fresco (Fig.16b). En el caso del kiwi y acelga no hubo diferencias significativas en la dureza (Fig.16a), sin embargo para los dos productos se observó una tendencia al aumento de la misma. La pérdida de dureza durante la deshidratación se puede atribuir a cambios en los componentes, en el espesor de la pared celular, en el tamaño y forma de las células, en el volumen de los espacios intercelulares y en la pérdida de turgencia (Chiralt y Talens, 2005).

#### 6.1.4. Actividad antioxidante

El cambio en la capacidad antioxidante expresado como  $1/EC_{50}$  por gramo de tejido del producto se muestra en la Fig. 17.



**FIGURA 17. CAPACIDAD ANTIOXIDANTE DE LOS PRODUCTOS FRESCOS Y DESHIDRATADOS EN HORNO SOLAR ( $1/EC_{50}$  EN G DE TEJIDO DEL PRODUCTO).**

\*Letras diferentes indican diferencias significativas ( $P \leq 0.05$ ).

Los resultados obtenidos mostraron una disminución en la capacidad antioxidante para el kiwi, tomate y acelga luego de la deshidratación. Mientras el kiwi mostró una diferencia significativa con respecto al fresco; el tomate y la acelga no mostraron diferencias significativas. La pérdida de la capacidad antioxidante puede deberse a la estructura del producto y la forma en que fueron cortados y expuestos para el proceso de deshidratación y a la pérdida por degradación térmica de los compuestos fotosensibles induciendo a la oxidación (Prakash y col, 2004; Stojanovic y Silva, 2007). Por otro lado y contrario al comportamiento de los productos anteriormente mencionados, la frambuesa mostró un aumento significativo ( $P < 0.05$ ) de la capacidad antioxidante. Una de las razones a las que

podría atribuirse este aumento después del proceso de secado, es la estructura de la misma (agrupación de varias drupas). Este producto fue sometido a la deshidratación sin ningún corte, por consecuencia la pérdida de agua produjo una concentración de solutos en el interior del producto.

Un estudio realizado en secado por microondas de frutilla entera mostró un aumento en la capacidad antioxidante del producto (Wojdylo y col, 2009) en concordancia con los resultados obtenidos en nuestro trabajo en frambuesa. En la tabla 3 se muestran los valores de la capacidad antioxidante de los productos frutihortícolas frescos y secos luego del tratamiento solar.

**TABLA 3. CAPACIDAD ANTIOXIDANTE (1/EC50).**

	<b>1/EC50 (1/g muestra)</b>			
	<b>Frambuesa</b>	<b>Kiwi</b>	<b>Tomate</b>	<b>Acelga</b>
<b>Frescos</b>	0.2654 <sup>a</sup>	0.2108 <sup>c</sup>	0.0305 <sup>e</sup>	0.0534 <sup>f</sup>
<b>Secos</b>	0.4627 <sup>b</sup>	0.1053 <sup>d</sup>	0.0257 <sup>e</sup>	0.0349 <sup>f</sup>

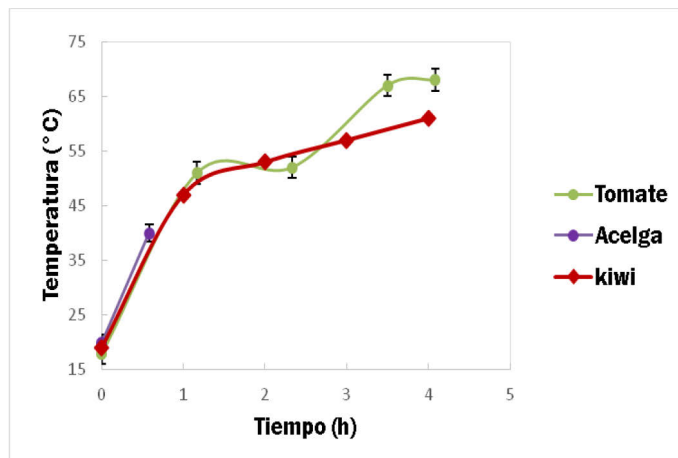
**\* Letras diferentes indican diferencias significativas ( $P \leq 0.05$ )**

## **6.2. Secado por microondas**

### **6.2.1. Historias térmicas**

En la Fig. 18 se muestra el comportamiento de la temperatura en función del tiempo durante el proceso de secado por microondas. El kiwi y tomate mostraron un rápido

aumento de la temperatura al inicio del proceso, seguido de una ralentización en el aumento de la misma manteniéndose hasta llegar al final del secado, donde alcanzaron humedades menores al 22%. Por otro lado, la acelga mostró un aumento acelerado alcanzando una humedad final del 4 %. Estudios previos informados por Ozkan y col, (2007) muestran una alta absorción de la potencia de las microondas durante la primera fase del proceso, ya que el contenido de humedad del producto es alto. El agua, al ser una molécula polar, interactúa fácilmente con la radiación electromagnética, provocando un rápido aumento de temperaturas de acuerdo a la movilidad que presenta dentro del producto. A medida que el proceso de deshidratación progresa, la pérdida de humedad en el producto causa un descenso en la absorción de potencia de microondas y por lo tanto, la velocidad de deshidratación cae.



**FIGURA 18. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DURANTE EL PROCESO DE SECADO POR MICROONDAS.**

Los tiempos y las temperaturas de secado obtenidos para cada producto en el secado por microondas se muestran en la Tabla 4. No se observaron diferencias significativas entre



ambos parámetros para el kiwi y el tomate ( $P < 0.05$ ) con un tiempo de 4 h y un valor de temperatura media de 57°C. Mientras tanto la acelga tardó 0.5 h con una menor temperatura de 40°C alcanzando una humedad final de un 4 % aproximadamente.

**TABLA 4. TEMPERATURA Y HUMEDAD MEDIA DE LOS PRODUCTOS EN SECADO POR MICROONDAS.**

Alimento	Tiempo de		Humedad inicial		Humedad final (%)
	secado (h)	Temp. media (°C)	Temp. Max (°C)	(%)	
<b>Kiwi</b>	4	54.5 ± 6	61 ± 1	85.61 ± 0.14	21.54 ± 0.1
<b>Tomate</b>	4	59.5 ± 9	68 ± 1	95.22 ± 0.5	21.79 ± 1.0
<b>Acelga</b>	0.5	40 ± 30	40 ± 1	86.55 ± 0.0	3.73 ± 0.16

La capacidad de interacción con las microondas se relaciona con las propiedades dieléctricas de acuerdo a Ec 11. En la Tabla 5 se muestran los valores de la permitividad y el factor de pérdida para diversas frutas y hortalizas. El valor del factor de pérdida para el kiwi es de 18 (Sosa Morales, 2010), para el tomate 18 (Heredia y col, 2007) y para la acelga 22 (Sipahioglu y Barringer, 2003). Por lo tanto, la potencia por unidad de volumen es equivalente en los tres sistemas, la diferencia radica en el volumen de la muestra. A menor volumen, mayor densidad de potencia ( $W/m^3$ ), por lo tanto el alimento se calentará a mayor velocidad, como ocurre en el caso de las hojas de acelga.

**TABLA 5. PROPIEDADES DIELECTRICAS DE PRODUCTOS FRUTIHORTICOLAS.**

<b>Producto frutihortícolas</b>	<b>Constante dieléctrica (915 MHz)</b>	<b>Factor de pérdida (915 MHz)</b>
<b>Manzana</b>	74.3	8.5
<b>Banana</b>	64	19
<b>Zanahoria</b>	59	18
<b>Chirimoya</b>	59	25.4
<b>Cereza</b>	91.2	16.4
<b>Pepino</b>	71	11
<b>Uva</b>	69	15
<b>Kiwi</b>	70	18
<b>Limón</b>	73	15
<b>Mango</b>	64	13
<b>Papa</b>	62	22
<b>Rábano</b>	68	20
<b>Fresa</b>	73	14
<b>Melocotón</b>	70	12
<b>Pera</b>	67	11

\*Adaptado Sosa Morales, 2010

### 6.2.2. Pérdida de peso

6.2.3. En la Fig. 19 se muestran los resultados de la pérdida de peso en función del tiempo de los productos frutihortícolas sometidos a microondas. Se normalizó el  $\Delta P/P_0$  en función del tiempo, con el mismo objetivo de la Sección 6.1.2.

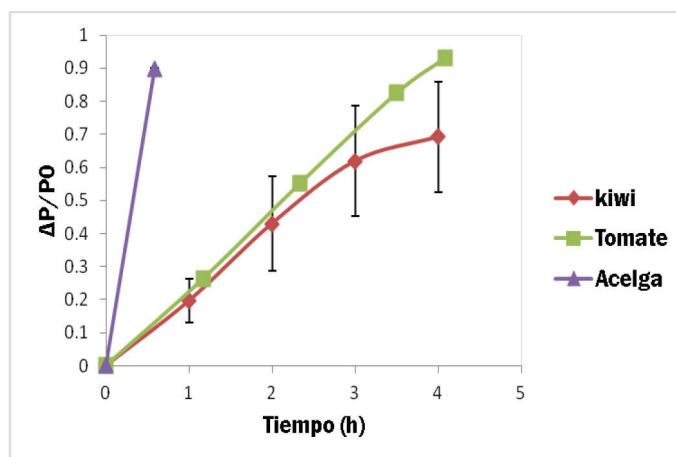


FIGURA 19. PÉRDIDA DE PESO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO, SECADO POR MICROONDAS.

Se observa que la relación de pérdida de peso ( $\Delta P/P_0$ ) de los productos es directamente proporcional al tiempo de secado. La acelga mostró una pérdida de peso adimensional casi de 1, en un tiempo corto de 0.5 h, mostrando un comportamiento diferente a los otros productos evaluados para este método de secado. Mientras tanto el kiwi y el tomate no mostraron diferencias significativas entre ellos en los valores de pérdida de peso y al mismo tiempo alcanzaron el peso necesario para llegar a una humedad final inferior al 22 %. Como se explicó en la sección anterior, el aumento volumétrico de temperaturas para la acelga fue abrupto, provocando una tasa de evaporación superior a los demás alimentos. Los mecanismos de deshidratación en este tipo de procesos, ayudan a la

eliminación del agua evaporada internamente ya que junto a la difusión se presenta el movimiento convectivo en el interior del producto (mecanismo de Darcy).

El tiempo de secado por microondas disminuyó hasta 3 veces comparado con el secado solar. En trabajos previos se demostró que el tiempo necesario para reducir el contenido de humedad fue 6 veces menor con el uso de microondas con respecto al método de secado por aire a 70°C en cubos de papa (Bondaruk y col, 2007).

#### 6.2.4. Color

En las Figuras 20, 21 y 22 se muestran el comportamiento del color de los productos frutihortícolas secados por microondas.

En la Fig. 20, se muestra el cambio de color del kiwi observándose diferencias significativas en los tres parámetros evaluados. La luminosidad mostró un aumento, al igual que la cromaticidad  $a^*$  y  $b^*$  mostrando un aumento en la tonalidad roja y amarilla, tomando la apariencia de acaramelado; posiblemente a la caramelización de los azúcares después de una hidrólisis por el calentamiento (Fennema, 1993).

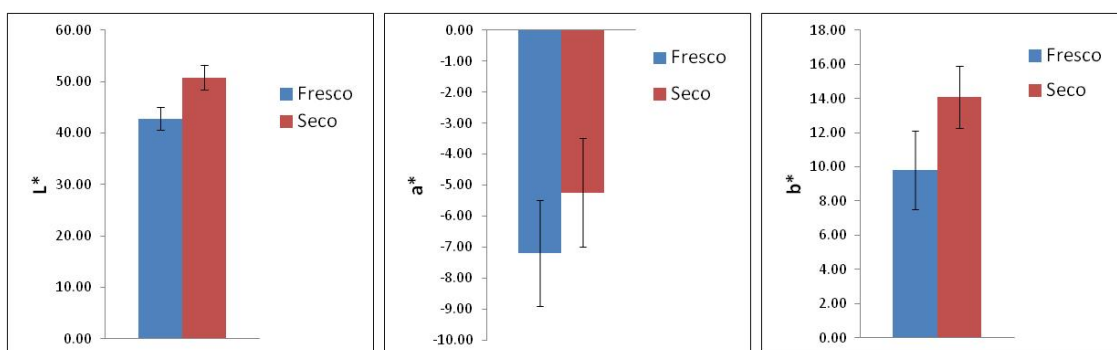
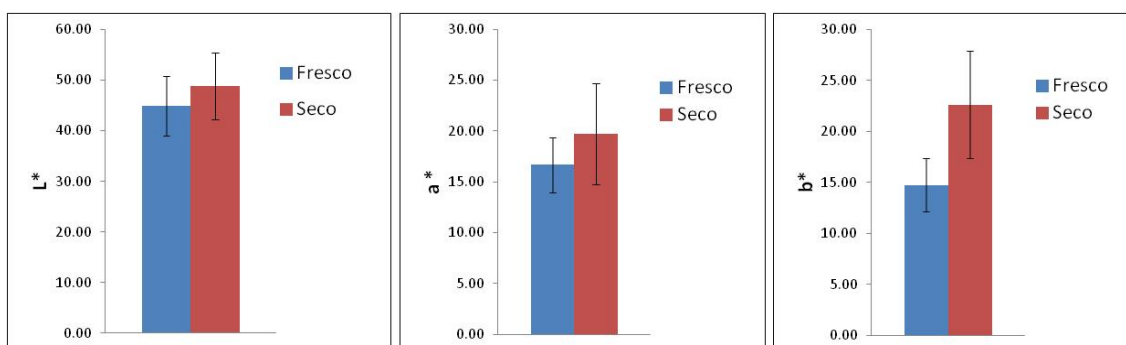


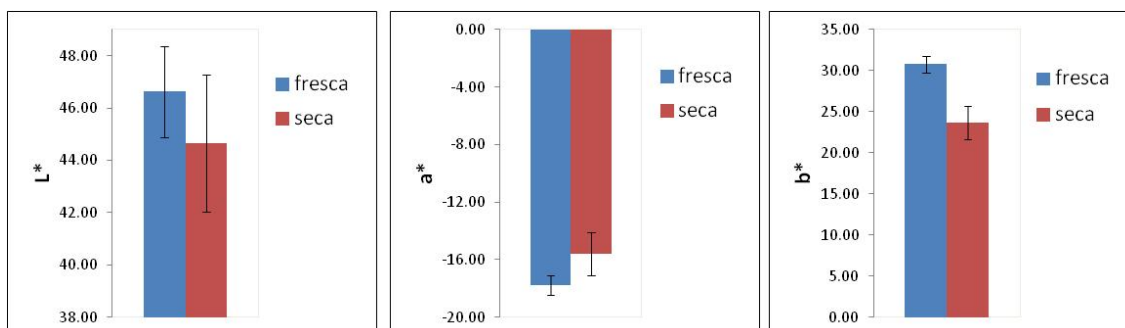
FIGURA 20. PARÁMETROS DE COLOR PARA EL KIWI (SECADO POR MICROONDAS).

En el caso del tomate también se vio un aumento en los parámetros, sin embargo no hubo diferencias significativas (Fig. 21). Los consumidores suelen asociar un color oscuro con un producto dulce y maduro; esos colores son debido en parte a una alta concentración de polifenoles y de antioxidantes (Ringeisen y col, 2014).



**FIGURA 21. PARÁMETROS DE COLOR PARA EL TOMATE (SECADO POR MICROONDAS).**

El color en la acelga (Fig. 22) mostró un aumento significativo en el parámetro de cromaticidad  $a^*$  y disminución en el parámetro  $b^*$ . Sin embargo siempre se mantuvo con el mismo signo en la escala de cada color. La luminosidad en cambio no mostró diferencias significativas, pero hubo una leve reducción de la misma.



**FIGURA 22. PARÁMETROS DE COLOR PARA LA ACELGA (SECADO POR MICROONDAS).**

### 6.2.5. Textura

En la Fig. 23 se muestra el cambio de textura que sufrieron los productos después del secado por microondas. Se muestran los valores de dureza (N) de cada producto fresco y seco. Se observaron diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) en todos los productos.

El kiwi (Fig. 23a) y el tomate (Fig. 23b) presentaron una disminución aproximada de 67% y 90% respectivamente, resultando productos más blandos; la acelga (Fig. 23a) en cambio sufrió un aumento en la dureza y resultó un producto frágil y quebradizo.

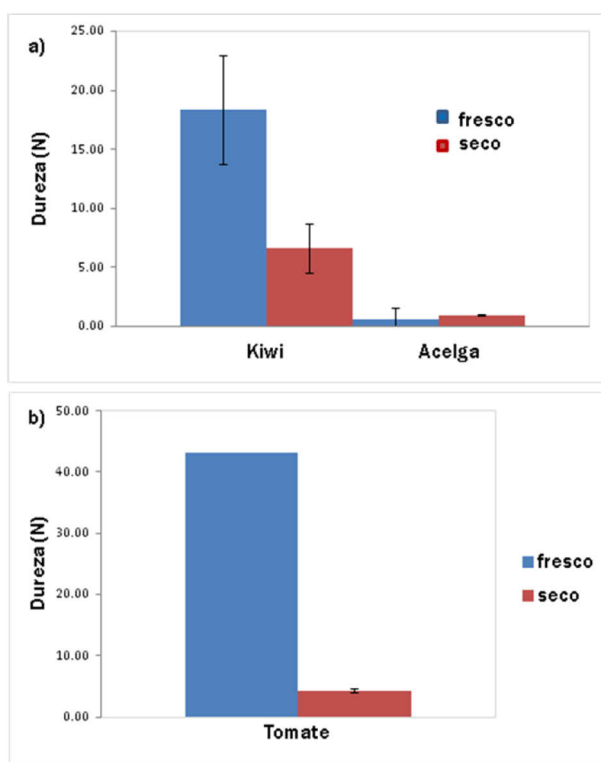


FIGURA 23. DUREZA (N) DE LOS ALIMENTOS SECADOS POR MICROONDAS. A) KIWÍ, ACELGA. B) TOMATE.

### 6.2.6. Antioxidantes

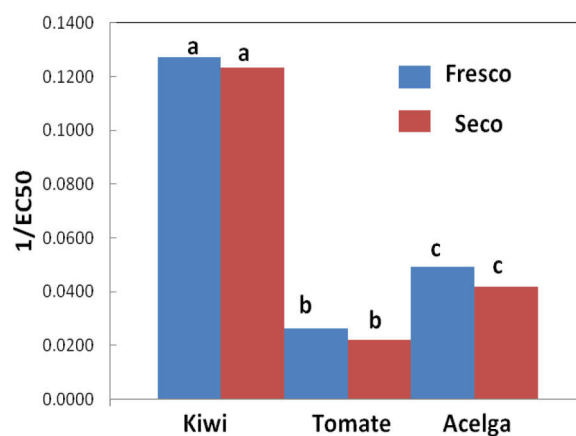
En la Fig.24 se muestran los resultados del cambio en la capacidad antioxidante expresado como 1/EC50 en g de tejido del producto y en la Tabla 6 se muestran los valores obtenidos.

**TABLA 6. CAPACIDAD ANTIOXIDANTE (1/EC50).**

	<b>1/EC50 (1/g muestra)</b>		
	<b>Kiwi</b>	<b>Tomate</b>	<b>Acelga</b>
<b>Frescos</b>	0.1274 <sup>a</sup>	0.0263 <sup>b</sup>	0.0493 <sup>c</sup>
<b>Secos</b>	0.1233 <sup>a</sup>	0.0219 <sup>b</sup>	0.0418 <sup>c</sup>

**\* Letras iguales indican que no hay diferencias significativas (P > 0.05).**

Se observó una tendencia a la disminución de la capacidad antioxidante, pero las diferencias no fueron significativas (P > 0.05). Carta y Loddo, (2002) atribuyen las pérdidas de compuestos polifenólicos a la oxidación de los mismos generada por el microondas. El empleo de altas potencias en secado por microondas mostró un descenso en la concentración de antioxidantes en zanahorias, en un trabajo realizado por Prakash y col (2004). En nuestros ensayos, las temperaturas no excedieron los 70°C; el tiempo de secado fue corto y la potencia usada mínima, por lo tanto no hubo pérdidas importantes de los compuestos antioxidantes.



**FIGURA 24. CAPACIDAD ANTIOXIDANTE EN PRODUCTOS SECADOS POR MICROONDAS (1/EC50 EN G DE TEJIDO DEL PRODUCTO).**

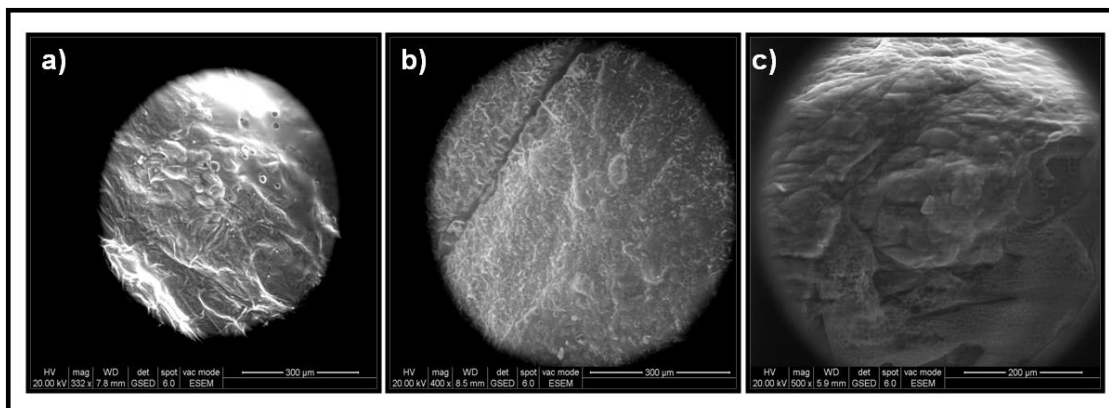
**\*Letras iguales indican que no hay diferencias significativas ( $P > 0.05$ ).**

#### **6.2.7. Microestructura**

La deshidratación trae como consecuencia cambios estructurales debido a la pérdida de agua dependiendo de la temperatura, la velocidad de calentamiento y el tiempo de exposición. Las alteraciones físicas incluyen encogimiento, aumento de porosidad, disminución de la capacidad de absorber agua y daños en la estructura microscópica (Witrowa-Rajchert y Rząca, 2009). En nuestro estudio se realizaron micrográficas ESEM para comparar el daño sufrido de cada producto dependiendo del método usado (solar o microondas).

En las Figuras 25, 26 y 27 se muestran las micrografías de los productos deshidratados.

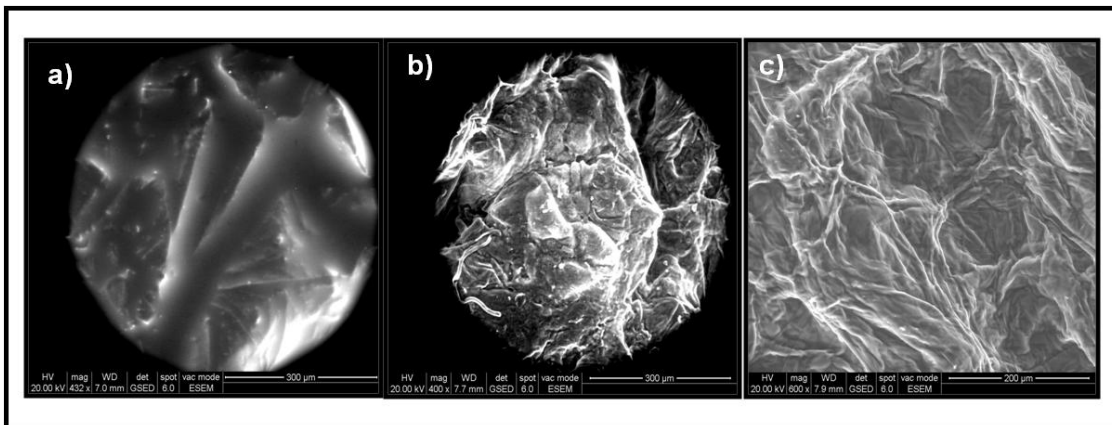




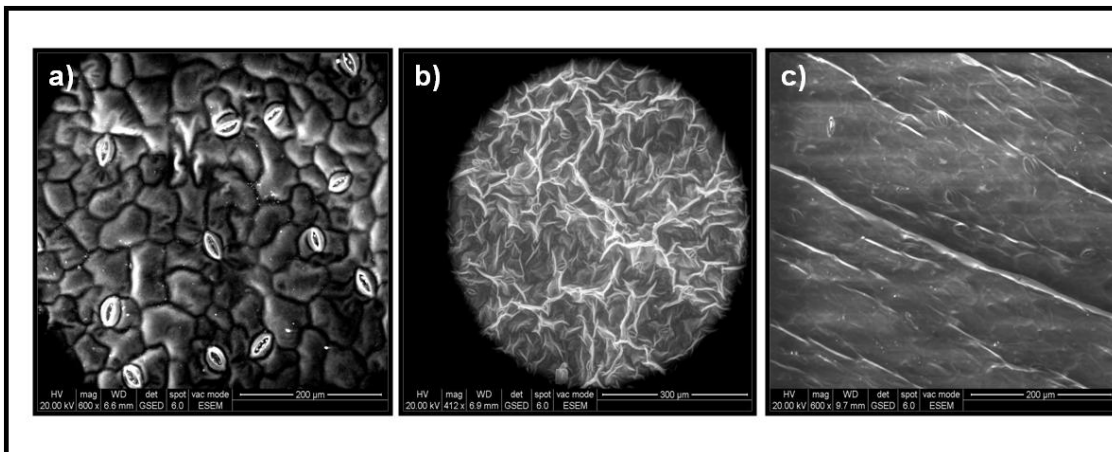
**FIGURA 25. MICROESTRUCTURA DEL KIWI. A) FRESCO, B) SECADO SOLAR, C) SECADO POR MICROONDAS.**

La Fig. 25 muestra las micrografías obtenidas del kiwi, donde se observa la aparición de espacios intercelulares más pequeños en los productos deshidratados comparados con el fresco, siendo mucho menor en el secado solar que en el microondas. Asimismo se observa un encogimiento celular y un aparente descenso en la turgencia del producto deshidratado frente al producto fresco. Estos resultados guardan concordancia con los obtenidos en el análisis de textura, donde se ve una mayor dureza en el secado solar posiblemente debido al encogimiento sufrido.

En la Fig. 26, a partir de las micrografías del tomate, se observa un colapso de los tejidos lo que puede conducir a una menor dureza y se correlaciona perfectamente con los resultados obtenidos en los perfiles de textura estudiados anteriormente.



**FIGURA 26. MICROESTRUCTURA DEL TOMATE A) FRESCO, B) SECADO SOLAR, C) SECADO POR MICROONDAS.**



**FIGURA 27. . MICROESTRUCTURA DE ACELGA A) FRESCA, B) SECADO SOLAR, C) SECADO POR MICROONDAS.**

En la Fig. 27 se observan las micrografías de la acelga. En el producto fresco se alcanza a visualizar los estomas de la hoja, luego se encogen y se reducen como se muestra en las micrografías de la acelga seca por los dos métodos aplicados. Sin embargo el secado solar deja ver un colapso y rompimiento de los tejidos mayor que en el microondas (estructura más rugosa). Cabe destacar que si bien las temperaturas a las que llegan los productos en el secado por microondas son más altas, el tiempo de exposición es menor, por lo tanto se reduce el daño en la estructura de los tejidos. En el secado por microondas, la rápida absorción de la energía de las moléculas provoca la evaporación rápida del agua. Además

de mejorar la velocidad de secado, este flujo hacia el exterior ayuda a prevenir la contracción de la estructura del tejido, que prevalece en la mayoría de las técnicas de secado de aire convencionales. Por lo tanto se puede esperar mejores características de rehidratación en el secado por microondas (Khraisheh y col, 1997; Prabhanjan y col, 1995).

## **7. OBSERVACIONES**

### **7.1. Imágenes de los productos (observaciones visuales)**

En las siguientes figuras se muestran las fotografías reales de los productos frescos y secos obtenidos después del secado solar y microondas, con el fin de comparar visualmente los dos métodos de secado.



**FIGURA 28. FOTOGRAFÍAS DE FRAMBUESAS.**

En las fotografías de las frambuesas se observa una mayor opacidad del producto seco, así como también un color más oscuro y un encogimiento de los frutos en relación al producto fresco (Fig.28).



**FIGURA 29. FOTOGRAFÍAS DEL KIWI.**

En el caso del kiwi, después del secado solar se observa un color más amarronado, mientras que después del secado por microondas conserva una tonalidad verdosa semejante al producto fresco. Estos resultados coinciden con los parámetros  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  medidos (Secciones 6.1.3 y 6.2.3).



**FIGURA 30. FOTOGRAFÍAS DE TOMATES.**

Las fotografías de los tomates secos muestran diferencias entre los dos métodos y con el producto fresco. La tonalidad final del producto coincide con análisis realizado a través de los parámetros de luminosidad y cromaticidad (Fig.30). Además se observa la pérdida de la estructura interna que se corresponde con la disminución de la dureza.



**FIGURA 31. FOTOGRAFÍAS DE ACELGAS.**

En la Fig. 31 se muestran las fotografías de las hojas de acelga donde no se visualizan diferencias mayores excepto en la opacidad de la muestra tratada con secado solar. En la Tabla 7 se muestran los valores de los parámetros estudiados en los productos frutihortícolas deshidratados obtenidos por los diferentes métodos de secado (solar y microondas).

**TABLA 7. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS PRODUCTOS POR SECADO SOLAR Y MICROONDAS.**

	Frambuesa		Kiwi		Tomate		Acelga	
	Solar	Solar	Microondas	Solar	Microondas	Solar	Microondas	
Tiempo de secado (h)	16	11	4	14	4	5	0.5	
Temperatura máxima	60	61	61	51	68	51	40	
Humedad inicial	72	81	85	91	95	86	86	
Humedad final	14	20	22	17	22	3	4	
L* (fresco/seco)	43 / 43	46 / 41	43 / 50	44 / 44	45 / 49	42 / 50	47 / 45	
a* (fresco/seco)	11 / 12	-7 / 2	-7 / -5	19 / 9	17 / 20	-7 / -5	-18 / -16	
b* (fresco/seco)	3 / 4	15 / 5	10 / 14	15 / 9	15 / 23	10 / 14	31 / 24	
Dureza (N) (fresco/seco)	2.63 / 4.40	25.65 / 30.17	18.33 / 6.64	97.80 / 5.64	43.08 / 4.37	1.37 / 1.55	0.62 / 0.97	
Dpph (1/g muestra) (fresco/seco)	0.26 / 0.46	0.21 / 0.10	0.127 / 0.123	0.03 / 0.02	0.026 / 0.021	0.05 / 0.03	0.049 / 0.041	

El tiempo de secado es mucho mayor para el secado solar en los tres productos que se estudiaron (kiwi, tomate y acelga). En el kiwi el tiempo de secado por microondas disminuyó aproximadamente en tres veces comparado con el solar, en el tomate un poco más de la tercera parte y en la acelga resultó diez veces menor.

El kiwi alcanzó igual temperatura máxima en los dos métodos de secado, y el porcentaje de pérdida de peso fue el mismo. El contenido de antioxidante disminuyó en ambos casos, siendo mayor la reducción para el secado solar. La dureza se afectó para ambos métodos, en el secado solar se observó un aumento en la dureza y en el secado por microondas la dureza tuvo una disminución. Finalmente mostró mayor diferencias en el color para secado solar.

El tomate alcanzó una mayor temperatura máxima en el secado por microondas alcanzando así un tiempo de secado final mucho menor de casi cuatro veces menos que el secado por horno solar; sin embargo para este producto el peso perdido durante el

secado fue aproximadamente igual en los dos métodos usados. El contenido de antioxidante en el tomate deshidratado por ambos métodos tuvo una disminución, sin embargo no fue significativa. La dureza se vio afectada de forma significativa en ambos métodos mostrando una disminución en la misma; para el parámetro de color se observó un color más oscuro en el secado solar, mientras para el secado por microondas el color rojo resultó semejante al del tomate fresco. Finalmente, la acelga alcanzo los valores más bajos de tiempo de secado para solar y microondas, siendo para este último un tiempo de ocho veces menor que en el secado solar, sin embargo alcanzaron aproximadamente la misma humedad. La actividad antioxidante resultó menor en los dos métodos con respecto al producto al fresco. La dureza resultó mayor en la tratada con microondas con respecto a la fresca y a la deshidratada por secado solar; en cuanto al color no se presentaron diferencias significativas para el producto sometido a ambos métodos de deshidratación.

## **CONCLUSIONES**

En este trabajo de Tesis, se determinó la variación de temperatura y de peso de diferentes productos durante la deshidratación solar y microondas. Asimismo se estudió la calidad de los productos secos obtenidos por los dos métodos en relación a los controles frescos.

Se concluye en principio para el secado solar que: la temperatura máxima que alcanza el alimento a deshidratar, depende del valor alcanzado por el horno que a su vez depende

de la tasa de radiación solar; el tiempo de secado no depende de la temperatura; la temperatura alcanzada mantiene un valor promedio para los diferentes productos frutihortícolas, sin embargo depende de la estructura del producto, la forma de exposición al secado (rodajas o entero) y la pérdida de peso que se requiera.

Para el caso de microondas, el tiempo de secado de los productos no puede atribuirse a la temperatura de secado ni a la estructura de los mismos; a pesar de mantener la misma potencia para todos los productos, se atribuye básicamente a la densidad de potencia, esto es, a la potencia disipada por unidad de volumen de la muestra.

En cuanto a la calidad de los productos deshidratados, visualmente son llamativos; el color aunque tiene variabilidad, se asocia a productos maduros, dulces y en buen estado.

La capacidad antioxidante si bien sufrió disminuciones en los dos métodos, estas pueden considerarse no significativas comparadas con otros estudios realizados en métodos tradicionales, como secado convectivo con aire caliente.

La textura de los productos varió dependiendo de los métodos utilizados, atribuible a alteraciones en la estructura celular de los tejidos. Este factor requiere un estudio posterior para la mejora de la calidad de cada producto, ya sea la combinación con otros métodos, optimización de tiempos o variabilidad de la potencia.

Los productos deshidratados obtenidos, según su variación de textura, pueden ser destinados al consumo directo o incluidos en la elaboración de otros productos como granolas, cereales, sopas, yogur, etc.



Los métodos usados muestran buenos resultados para los productos estudiados en cuanto a su calidad y su aspecto visual a pesar de las diferencias encontradas con respecto al alimento fresco. La elección de cada método, va a depender de los intereses económicos, del factor climático, de los frutos que se requieran deshidratar y su uso final.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

Alustiza, H. R. (2002). Energía solar. *Universidad Nacional de La Plata, Fac. de Ingeniería.*

Cátedra Termotecnia V.

AOAC. (1985). Official methods of analysis (13th ed.). Washington: Association of

Official Analytical Chemists.

Arballo, J. R., Campañone, L. A. & Mascheroni, R. H. (2010). Modeling of microwave drying of fruits. *Drying Technology*, 28(10), 1178-1184.

Arballo, J. R. (2013). Modelado y simulación de la deshidratación combinada osmótica-microondas de frutihortícolas. *Universidad Nacional de La Plata*. Tesis doctoral.

Belessiotis, V. & Delyannis, E. (2011). Solar drying. *Solar Energy*, 85(8), 1665-1691.

Bobinaitė, R., Viškelis, P., & Venskutonis, P. R. (2012). Variation of total phenolics, anthocyanins, ellagic acid and radical scavenging capacity in various raspberry (*Rubus spp.*) cultivars. *Food Chemistry*, 132(3), 1495-1501.

Bondaruk, J., Markowski, M., & Blaszcak, W. (2007). Effect of drying conditions on the quality of vacuum-microwave dried potato cubes. *Journal of Food Engineering*, 81(2), 306-312.

- Campañone L.A., Mackeprang M. & Paola C.A. (2012). Aplicación de Energía Solar combinada con Microondas para la deshidratación de frutas y vegetales. Presentado en VII *Congreso de medio ambiente AUGM*, La Plata, Argentina, 22 al 24 de Mayo.
- Cantwell, M., & Kasmire, R. (2007). Tecnología postcosecha de cultivos hortofrutícolas. Universidad de California. Centro de Información e Investigación en Tecnología Postcosecha. *Series de Horticultura Postcosecha* 3ª edición. 24, 469-570.
- Carta, R., & Loddó, L. (2002). Effect of microwave radiation on the acetate-catalyzed hydrolysis of phenyl acetate at 25 °C. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 41(24), 5912-5917.
- Código Alimentario Argentino de la Canal y Asociados SRL, CAA. Cap. XI, Artículo 819, 820, 821, 887.
- Consejo Federal de Inversiones (CFI) [en línea]: <http://www.cfired.org.ar/Default.aspx?nId=848>, (2013).
- Chandrasekaran, S., Ramanathan, S., & Basak, T. (2013). Microwave food processing-A review. *Food Research International*, 52(1), 243-261.
- Cheftel, J. C., Cheftel, H., & Besacón, P. (1992). *Introducción a la bioquímica y tecnología de los alimentos*. Capítulo VI. Editorial Acribia, Zaragoza, España; 404p.
- Chen, Z., Bertin, R., & Frolidi, G. (2013). EC50 estimation of antioxidant activity in DPPH assay using several statistical programs. *Food Chemistry*, 138(1), 414-420.
- Chiralt, A., & Talens, P. (2005). Physical and chemical changes induced by osmotic dehydration in plant tissues. *Journal of Food Engineering*, 67(1-2), 167-177.

- Datta, A.K. (2007). Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. I: Problem formulations. *Journal of Food Engineering*, 80 (1), 80-95.
- Debilidades y desafíos tecnológicos del sector productivo. [en línea]: [http://www.cofecyt.mincyt.gov.ar/pdf/productos\\_alimenticios/Frutihorticola/Hortalizas.pdf](http://www.cofecyt.mincyt.gov.ar/pdf/productos_alimenticios/Frutihorticola/Hortalizas.pdf), (2013).
- Dissa, A. O., Bathiebo, J., Kam, S., Savadogo, P. W., Desmorieux, H., & Koulidiati, J. (2009). Modelling and experimental validation of thin layer indirect solar drying of mango slices. *Renewable Energy*, 34(4), 1000-1008.
- Duffie, J. A. & B., W. A. (1980). Solar energy thermal processes. *University of Wisconsin*, Ed. Wiley, New York.
- Durance, T. & Yaghmaee, P. (2011). Microwave dehydration of food and food ingredients, In: Comprehensive Biotechnology (Second Edition), Ed. Murray Moo-Young. Academic Press, Burlington. ISBN 9780080885049, 10.1016/B978-0-08-088504-9.00306-8.
- El kiwi en la argentina [en línea]: <http://www.agroconsultoraplus.com/noticiaskiwi.htm>, (2013).
- Farid, M. M. (2010). *Mathematical Modeling of Food Processing*. Editorial CRC Press, Auckland, New Zealand, 999p.
- Fellows, P.J. (2000). *Food processing technology, principles and practice*. Editorial Woodhead Publishing Limited, Cambridge, Inglaterra.
- Fennema, O. R. (1993). *Química de los alimentos*. Editorial Acribia. España.

- Gunasekaran, N. (2002). Effect of fat content and food type on heat transfer during microwave heating. Tesis Maestría. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia.
- Heredia, A., Barrera, C. & Andrés, A. (2007). Drying of cherry tomato by a combination of different dehydration techniques. Comparison of kinetics and other related properties. *Journal of Food Engineering*. 80(1), 111-118.
- İÇİEr, F., & Baysal, T. (2004). Dielectrical Properties of Food Materials—1: Factors Affecting and Industrial Uses. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 44(6), 465-471.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). [em línea], <<http://inta.gob.ar/>> (2013).
- Jones, P. L. (1986). High frequency dielectric heating in paper making. *Drying Technology*, 4(2), 217-244.
- Kader, A. A. (1992). *Postharvest Technology of Horticultural Crops* University of California, Division of Agriculture and Natural Resources, Oakland, California.
- Kaya, A., Aydın, O., & Dincer, I. (2008). Experimental and numerical investigation of heat and mass transfer during drying of Hayward kiwi fruits (*Actinidia Deliciosa* Planch). *Journal of Food Engineering*, 88(3), 323-330.
- Khraisheh, M. A. M., Cooper, T. J. R., & Magee, T. R. A. (1997). Shrinkage characteristics of potatoes dehydrated under combined microwave and convective air conditions. *Drying Technology*, 15(3-4), 1003-1022.
- Krokida, M. K. & Maroulis, Z. B. (1999). Effect of microwave drying on some quality properties of dehydrated products. *Drying Technology*, 17(3), 449-466.

- Li, Z., Vijaya Raghavan, G. S., & Wang, N. (2010). Apple volatiles monitoring and control in microwave drying. *Food Science and Technology*, 43(4), 684-689.
- Maupoey, P. J. F., Grau, A. M. A., Sorolla, A. M. A., & Baviera, J. M. B. (2001). *Introducción al secado de alimentos por aire caliente*: Universitat Politècnica de Valencia. Zaragoza, España.
- Mekhilef, S., Saidur, R. & Safari, A. (2011). A review on solar energy use in industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 1777-1790.
- Meredith, R. (1998). *Engineering handbook of industrial microwave heating*. The Institution of Electrical Engineers, Londres.
- Mohsenin, N. N. (1980). *Thermal properties of food and agriculture materials*. Wiley Interscience Publishers, New York, USA.
- Navarro-González, I., García-Valverde, V., García-Alonso, J. & Periago, M. J. (2011). Chemical profile, functional and antioxidant properties of tomato peel fiber. *Food Research International*, 44(5), 1528-1535.
- Okos, M. R., Narishman, G., Singh, R. K., & Weitnauer, A. C. (1992). *Food dehydration*. In *Handbook of Food Engineering*. New York: Marcel Dekker.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, (FAOSTAT) base de datos. En: <http://faostat.fao.org/site/444/DesktopDefault.aspx?PageID=444#ancor>, (2011).
- Organización Mundial de la Salud (OMS). [en línea]: <http://www.who.int/dietphysicalactivity/fruit/es/index1.html> (2013).

- Ozisik, M. N. (1973). *Radiative transfer and interactions with conduction and convection*. A Wiley- Interscience publication.
- Ozkan, I. A., Akbudak, B. & Akbudak, N. (2007). Microwave drying characteristics of spinach. *Journal of Food Engineering*, 78(2), 577-583.
- Pardo, G. & Zufía, J. (2012). Life cycle assessment of food-preservation technologies. *Journal of Cleaner Production*, 28(0), 198-207.
- Perumal, R. (2007). *Comparative performance of solar cabinet, vacuum assisted solar and open sun drying methods*. McGill University, Montreal, Canada.
- Prabhanjan, D. G., Ramaswamy, H. S. & Raghavan, G. S. V. (1995). Microwave-assisted convective air drying of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering*, 25(2), 283-293.
- Prakash, S., Jha, S. K. & Datta, N. (2004). Performance evaluation of blanched carrots dried by three different driers. *Journal of Food Engineering*, 62(3), 305-313.
- Pyo, Y.-H., Lee, T.-C., Logendra, L. & Rosen, R. T. (2004). Antioxidant activity and phenolic compounds of Swiss chard (*Beta vulgaris* subspecies *cycla*) extracts. *Food Chemistry*, 85(1), 19-26.
- Rick, C. (1990). *Evolution of crop plants*. Longman Scientific and Technical, Essex, Inglaterra.
- Ringeisen, B., M. Barrett, D. & Stroeve, P. (2014). Concentrated solar drying of tomatoes. *Energy for Sustainable Development*, 19(0), 47-55.
- Rodoni, L., Casadei, N., Concellón, A. a., Chaves Alicia, A. R. & Vicente, A. R. (2009). Effect of short-term ozone treatments on tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit quality

- and cell wall degradation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(1), 594-599.
- SAGPYA. <http://informes.acabase.com.ar/Lists/SAGPYA%202012/AllItems.aspx>  
 santafe.com.ar/data/arch\_cont/archivos/36.pdf, (2013).
- Scalzo, J., Politi, A., Pellegrini, N., Mezzetti, B. & Battino, M. (2005). Plant genotype affects total antioxidant capacity and phenolic contents in fruit. *Nutrition*, 21(2), 207-213.
- Sipahioglu, O. & Barringer, S.A. (2003). Dielectric properties of vegetables and fruits as a function of temperature, ash, and moisture content. *Food Engineering and Physical Properties*, 68(19), 234-239.
- Soler-Rivas, C., Espín, J. C. & Wichers, H. J. (2000). An easy and fast test to compare total free radical scavenger capacity of foodstuffs. *Phytochemical Analysis*, 11(5), 330-338.
- Sosa-Morales, M. E., Valerio-Junco, L., López-Malo, A., García, H. S. (2010). Dielectric properties of foods: Reported data in the 21st Century and their potential applications. *Food Science and Technology*, 43(8), 1169-1179.
- Stojanovic, J. & Silva, J. L. (2007). Influence of osmotic concentration, continuous high frequency ultrasound and dehydration on antioxidants, colour and chemical properties of rabbiteye blueberries. *Food Chemistry*, 101(3), 898-906.
- Tunde-Akintunde, T. Y. (2011). Mathematical modeling of sun and solar drying of chilli pepper. *Renewable Energy*, 36(8), 2139-2145.
- USDA. National Nutrient Database for Standard Reference.  
 En: [http://www.nal.usda.gov/fnic/foodcomp/cgi-bin/list\\_nut\\_edit.pl](http://www.nal.usda.gov/fnic/foodcomp/cgi-bin/list_nut_edit.pl), (2013).

- Vadivambal, R. & Jayas, D. S. (2010). Non-uniform temperature distribution during microwave heating of food materials—A Review. *Food and Bioprocess Technology*, 3(2), 161-171.
- Valdez-Morales, M., Espinosa-Alonso, L. G., Espinoza-Torres, L. C., Delgado-Vargas, F. & Medina-Godoy, S. (2014). Phenolic content and antioxidant and antimutagenic activities in tomato peel, seeds, and by products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(23), 5281-5289.
- Vega-Mercado, H., Marcela Góngora-Nieto, M. & Barbosa-Cánovas, G. V. (2001). Advances in dehydration of foods. *Journal of Food Engineering*, 49(4), 271-289.
- Wanyo, P., Siriamornpun, S. & Meeso, N. (2011). Improvement of quality and antioxidant properties of dried mulberry leaves with combined far-infrared radiation and air convection in Thai tea process. *Food and Bioprocess Technology*, 89(1), 22-30.
- Witrowa-Rajchert, D. & Rząca, M. (2009). Effect of drying method on the microstructure and physical properties of dried apples. *Drying Technology*, 27(7-8), 903-909.
- Wojdyło, A., Figiel, A. & Oszmiański, J. (2009). Effect of drying methods with the application of vacuum microwaves on the bioactive compounds, color, and antioxidant activity of strawberry fruits. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(4), 1337-1343.